



**TUGAS AKHIR TM 091585**

**SIMULASI NUMERIK PADA DENSE PHASE  
PNEUMATIC CONVEYOR DENGAN VARIASI  
SUDUT PRESSURIZED AIR ASSISTED 45° dan 90°  
DAN R/D 1 , 1,5 , 2 PADA ELBOW VERTIKAL  
UNTUK MEREDUKSI TERJADINYA CLOGGED  
PADA SISTEM PERPIPAAN**

**M Sholikhudin Zuhdi**  
**2113 1050 35**

**Dosen Pembimbing**  
**Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**  
**197104051997021001**

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**



**FINAL PROJECT TM 091585**

**NUMERICAL SIMULATION ON DENSE PHASE  
PNEUMATIC CONVEYOR WITH VARIOUS  
PRESSURIZED AIR ASSISTED 45 ° AND 90 ° AND  
R / D 1, 1,5, 2 ON VERTICAL ELBOW TO REDUCE  
CLOGGED IN PIPE SYSTEM**

M Sholikhudin Zuhdi  
2113 1050 35

Advisor  
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.  
197104051997021001

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Engineering  
Sepuluh Nopember Institute of Technology  
Surabaya 2017**



**TUGAS AKHIR TM 091585**

**SIMULASI NUMERIK PADA DENSE PHASE  
PNEUMATIC CONVEYOR DENGAN  
VARIASI SUDUT PRESSURIZED AIR  
ASSISTED 45° dan 90° DAN R/D 1, 1,5, 2 PADA  
ELBOW VERTIKAL UNTUK MEREDUKSI  
TERJADINYA CLOGGED PADA SISTEM  
PERPIPAAN**

M Sholikhudin Zuhdi  
2113 1050 35

Dosen Pembimbing  
Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.  
197104051997021001

**DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017**



**FINAL PROJECT TM 091585**

**NUMERICAL SIMULATION ON DENSE  
PHASE PNEUMATIC CONVEYOR WITH  
VARIOUS PRESSURIZED AIR ASSISTED  $45^\circ$   
AND  $90^\circ$  AND R / D 1, 1,5 , 2 ON VERTICAL  
ELBOW TO REDUCE CLOGGED IN PIPE  
SYSTEM**

**M Sholikhudin Zuhdi**  
**2113 1050 35**

**Advisor**  
**Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**  
**197104051997021001**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**Faculty of Industrial Engineering**  
**Sepuluh Nopember Institute of Technology**  
**Surabaya 2017**

**SIMULASI NUMERIK PADA DENSE PHASE PNEUMATIC  
CONVEYOR DENGAN VARIASI SUDUT PRESSURIZED AIR  
ASSISTED 45° dan 90° DAN R/D 1, 1,5, 2 PADA ELBOW  
VERTIKAL UNTUK MEREDUKSI TERJADINYA CLOGGED  
PADA SISTEM PERPIPAAN**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**M SHOLIKHUDDIN ZUHDI**

NRP. 2113105035

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

- |    |   |               |
|----|---|---------------|
| 1. | <u>Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.</u> | (Pembimbing)  |
|    | NIP. 1971040519970211001                  |               |
| 2. | <u>Vivien Supandani, ST, ME, PhD</u>      | (Penguji I)   |
|    | NIP. 1981052920031220011                  |               |
| 3. | <u>Arif Bachtiar Krisna Putra, ST, MT</u> | (Penguji II)  |
|    | NIP. 1971052419970210011                  |               |
| 4. | <u>Aida Annisa Angga Darmas, ST</u>       | (Penguji III) |
|    | NIP. 198907052015042005                   |               |

**SURABAYA  
JULI, 2017**

**SIMULASI NUMERIK PADA DENSE PHASE  
PNEUMATIC CONVEYOR DENGAN VARIASI  
SUDUT PRESSURIZED AIR ASSISTED 45° dan 90°  
DAN R/D 1 , 1,5, 2 PADA ELBOW VERTIKAL  
UNTUK MEREDUKSI TERJADINYA CLOGGED  
PADA SISTEM PERPIPAAN**

**Nama** : M Sholikhudin Zuhdi  
**NRP** : 2113105035  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T.,  
M.T

**Abstrak**

*Pneumatik Conveyor disebut juga air conveyor digunakan untuk memindahkan material curah dengan memanfaatkan aliran udara dalam pipa. Prinsip umum cara kerja dari semua jenis pneumatic conveyor adalah gerak pindah dari material dihasilkan oleh aliran yang cepat dari udara atau mempengaruhi material curah sehingga dapat berpindah seperti berpindahnya cairan didalam pipa. Pesawat pneumatic banyak digunakan dalam industri seperti pemindahan antara gudang untuk loading dan unloading dari kapal laut, penyimpanan dalam hopper atau silo. Pemindahan material curah dengan aliran udara dalam pipa memiliki kelebihan seperti: material dipindah dengan ruangan yang tertutup (pipa) sehingga kerugian karena hilangnya material kecil, sedikit menimbulkan debu, pemakaian ruang yang ekonomis, mudah dalam perubahan arah dari pipa sehingga perubahan arah pemindahan juga mudah, sedikit pelayanan dari operasinya, dan tidak banyak bagian yang bergerak, dan dapat bekerja secara otomatis..*

*Ilmu yang mempelajari metode penelitian secara numerik adalah CFD (Computational Fluid Dynamic). Dalam tugas akhir ini penelitian CFD difokuskan untuk meneliti terjadinya fenomena clogging dalam elbow vertical. Simulasi dilakukan dengan memvariasikan Sudut Injected air assisting dengan variasi 45° pada inlet elbow dan 90° pada elbow serta R/D=1, R/D=1,5, dan R/D=2 .*

*Dari hasil simulasi didapatkan hasil berupa data kuantitatif yaitu average velocity magnitude dan average DPM concentration, serta data kualitatif berupa contour velocity magnitude dan contour DPM concentration di tiap surface yang ditentukan pada elbow 1 dan elbow 2. Hasil simulasi menunjukkan pada contour velocity magnitude desain injeksi R/D 1 dengan sudut injeksi 90° lebih bagus dalam mengurangi clogged, pada R/D 1,5 sudut injeksi 45° lebih bagus dalam mengurangi clogged, dan pada R/D 2 sudut injeksi 90° lebih bagus dalam mereduksi clogged, sehingga semakin besar rasio R/D dan dengan sudut injeksi 90° atau searah dengan arah aliran maka clogged yang direduksi bisa semakin besar*

***Kata kunci : pneumatik konveyor, pipa, clogging, elbow, Injected air assisting***

**NUMERICAL SIMULATION ON DENSE PHASE  
PNEUMATIC CONVEYOR WITH VARIOUS  
PRESSURIZED AIR ASSISTED 45 ° AND 90 ° AND R  
/ D 1, 1.5, 2 ON VERTICAL ELBOW TO REDUCE  
CLOGGED IN PIPE SYSTEM**

**Name : M Sholikhudin Zuhdi**  
**NRP : 2113105035**  
**Department : Mechanical Engineering FTI-ITS**  
**Advisor : Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T.**

**Abstract**

*Pneumatic conveyor is also called conveyor water is used to move bulk materials by utilizing the airflow in the pipeline. The general principles of the workings of all kinds of pneumatic conveyors is moving the motion of the material produced by the rapid flow of air or affecting the bulk material so that it can move as the transfer fluid in the pipe. Pneumatic aircraft widely used in industries such as the transfer between warehouses for loading and unloading of ships, storage in a hopper or silo. The transfer of the bulk material with air flow in the pipeline has advantages such as: the material is moved to a closed room (pipe) so that the loss due to the loss of material is small, a little dirt, use of space that is economical, easy to change the direction of the pipe so that the change in the direction of displacement is also easy, little service from its operations, and not a lot of moving parts, and can work automatically.*

*The study of research methods are numerically CFD (Computational Fluid Dynamics). In this final task CFD research focuses on meneletiti occurrence of the phenomenon of clogging in vertical elbow. Simulations carried out by varying the angle of*



*the water Injected assisting with variations on the inlet elbow 45o and 90o on the elbow and  $R/D = 1$ ,  $R/D = 1.5$ , and  $R/D = 2$ .*

*From the simulation results obtained in the form of quantitative data that is average velocity magnitude and average DPM concentration, as well as qualitative data in the form of contour velocity magnitude and contour DPM concentration on each surface specified in elbow 1 and elbow 2. Simulation results show the contour velocity magnitude injection design  $R/D = 1$  with a better 90o injection angle dapalm reduces clogged, at  $R/D = 1.5$  injection angle 45o is better at reducing clogged, and at  $R/D = 2$  the injection angle of 90o is better in reducing clogged, so the greater the  $R/D$  ratio And with an injection angle of 90 ° or in the direction of flow, the reduced clogged can be greater*

***Keywords: pneumatic conveyors, pipe, clogging, elbow, assisting water Injected.***

## **KATA PENGANTAR**

Alhamdulillah, segala puji dan syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT, Tuhan penguasa alam, yang selalu melimpahkan rahmat dan hidayah-Nya sehingga dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Sholawat dan salam tetap kami panjatkan kepada Nabi Muhammad SAW sebagai suri tauladan kami.

Dalam penulisan proposal tugas akhir ini tidak semata-mata karena kemampuan penyusun, melainkan karena adanya bantuan dari berbagai pihak yang telah memberikan dorongan moral, pikiran dan tenaga untuk membantu penyusunan proposal tugas akhir ini sehingga dapat terselesaikan dengan baik. Untuk itu pada kesempatan ini penulis ingin menyampaikan terimakasih kepada seluruh pihak yang telah membantu secara moral maupun materi, yakni:

1. Dr. Wawan Aries Widodo, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing proposal tugas akhir yang telah banyak memberikan bimbingan, arahan dan ilmu yang tak ternilai harganya.
2. Bapak Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng, PhD selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI-ITS
3. Bapak Prof. Ir Sutardi M.Eng, PhD. selaku dosen wali yang selalu memberikan arahan kepada penulis. Terima kasih telah menjadi orang tua penulis selama kuliah di jurusan Teknik Mesin ITS.

4. Ayahku Bapak Kastijan dan Ibuku Sudarwati , dan keluarga besar yang selalu memberikan do'a dan motivasinya. Tanpa do'a dan motivasi itu penulis tidak bisa menyelesaikan proposal tugas akhir dengan baik.
5. Seluruh dosen Teknik Mesin yang telah memberikan ilmunya baik secara langsung maupun tidak langsung kepada penulis. Terima kasih banyak atas ilmu dan didikannya.
6. Seluruh pihak yang belum disebutkan di atas yang telah memberikan do'a, bantuan, dan dukungannya bagi penulis hingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu.

Penulisan tugas akhir ini masih banyak kekurangan, oleh karena itulah demi kesempurnaan segala kritik dan saran sangat penulis harapkan. Akhir kata semoga proposal tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi kita semua dalam pengembangan ilmu pengetahuan di masa depan.

Wassalamu'alaikumWr.Wb

Surabaya, Januari 2016

Penulis

## DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
KATA PENGANTAR .....	iii
ABSTRAK .....	iv
ABSTRACT.....	v
DAFTAR ISI .....	vi
DAFTAR GAMBAR .....	x
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR SIMBOL.....	xv
BAB.....	1
PENDAHULUAN .....	1
1.2 Rumusan Masalah .....	27
1.3 Tujuan Penelitian.....	7
1.4 Batasan Masalah.....	30
1.5 Manfaat Penelitian .....	31
1.6 Sistematika Penulisan Tugas Akhir .....	31
BAB II .....	12
TINJAUAN PUSTAKA.....	12
2.1 Dasar Teori Gas-Solid Flow .....	12
2.1.1 Abu Terbang (Fly Ash) Hasil Pembakaran.....	12

2.1.2	Sistem Pengangkutan Abu Terbang ( <i>Fly Ash Conveying Sistem</i> ).....	14
2.1.3	Sistem Pengangkutan Dengan Sistim <i>Pneumatic</i> ...	15
2.1.4	Solid Loading Ratio .....	15
2.1.5	Fraksi Volume .....	16
2.1.6	Aliran Gas-Solid .....	16
2.1.7	Dense dan dilute phase flow.....	17
2.1.8	Gaya Hambat ( Drag Force).....	19
2.1.9	Kecepatan Superficial Gas ( <i>Superficial Gas Velocity</i> ).....	21
2.1.10	Pressure Drop .....	21
2.1.11	Minimum Transport Velocity.....	22
2.1.12	Slip velocity .....	26
2.1.13	<i>Clogging</i> ( Penyumbatan) .....	26
2.1.14	Air Injection Sistem / Pressurized Air Assisted .....	27
2.2	Aliran di Dalam Pipa .....	28
2.2.1	Persamaan Energi pada Aliran Dalam Pipa .....	28
2.2.2	Mekanisme Terjadinya Separasi Aliran.....	30
2.2.3	Mekanisme Terjadinya Aliran Sekunder di Dalam <i>Elbow</i> .....	31
2.3	CFD (Computational Fluid Dynamics).....	33
2.3.1	Manfaat CFD.....	35
2.3.2	Proses Simulasi CFD.....	35
2.3.3	Kondisi Batas ..... <b>Error! Bookmark not defined.</b>	
2.3.3.1	Flow inlet dan exit boundaries.....	36
2.3.3.2	Wall, repeating, dan Pole boundaries .....	38
2.3.3.3	Internal cell zones .....	39
2.3.3.4	Internal face boundaries .....	40
2.4	Penelitian Terdahulu .....	41
2.4.1	Ac.Ma, Dkk (2010) .....	41
2.4.2	Sariadi (2015) .....	46

BAB III .....	53
METODOLOGI .....	53
3.1 Diagram Alir Penelitian .....	53
3.2 Menentukan Parameter.....	54
3.2.1 Parameter yang dijaga koonstan adalah :.....	54
3.2.2 Parameter yang Divariasikan:.....	55
3.3 Metode Numerik .....	55
3.3.1 Tahap Pengukuran Dimensi Pipa dan Elbow .....	55
3.3.2 Tahap Pre-processing .....	56
3.3.3 Tahap Processing .....	60
3.3.4 Tahap Post-processing.....	68
3.4 Diagram Alir Hasil Simulasi Penelitian .....	69
3.5 <i>Grid</i> Independensi dan Validasi.....	71
BAB IV.....	74
ANALISA DAN PEMBAHASAN.....	74
4.1 Analisa Vektor Velocity Magnitude Udara Pembawa Pada Aliran Gas-Solid .....	74
4.1.1 Kontur Vektor Velocity Tiap Penampang Tanpa Injeksi Pada Pipa R/D 2eat transfer rate (q) .....	75
4.2 Analisa Vektor Velocity Magnitude R/D 1 .....	78
4.2.1 Injeksi 45 R/D 1 .....	78
4.2.2 Injeksi 90 R/D 1 .....	80
4.3 Analisa Vektor Velocity Magnitude R/D 1 .....	84
4.3.1 Injeksi 45 R/D 1,5 .....	84
4.3.2 Injeksi 90 R/D 1,5 .....	86
4.4 Analisa Vektor Velocity Magnitude R/D 2 .....	90
4.4.1 R/D 2 Injeksi 45 .....	90

4.4.2 R/D 2 injeksi 90 .....	92
4.5 Analisa DPM Concentration Terhadap Penyebaran Partikel pada Aliran <i>Gas-Solid</i> .....	97
4.5.1 Tanpa Injeksi .....	98
4.5.2 R/D 1 Injeksi 45 .....	101
4.5.3 R/D 1 Injeksi 90 .....	103
4.6 Analisa DPM Concentration R/D 1,5 .....	107
4.6.1 R/D 1,5 injeksi 45 .....	107
4.6.2 R/D 1,5 Injeksi 90 .....	110
4.7 Analisa DPM Concentration R/D 2 .....	114
4.7.1 R/D 1,5 Injeksi 45 .....	114
4.7.2 R/D 1,5 Injeksi 90 .....	116
4.8 Analisa Perbandingan DPM Concentratin Pada Tiap Penampang Aliran Setelah Meninggalkan Elbow 1 dan Elbow 2 .....	120
<b>BAB V .....</b>	<b>125</b>
<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>125</b>
5.1 Kesimpulan .....	125
5.2 Saran .....	126
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>128</b>
<b>BIOGRAFI PENULIS .....</b>	<b>129</b>

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Pneumatik Konveyor .....	7
Gambar 2.1 Partikel Flyash dan ButtomAsh .....	8
Gambar 2.2 Visualisasi perbedaan dense dan dilute phase .....	9
Gambar 2.3 gaya hambat pada benda yang melaju .....	11
Gambar 2.4 Keseimbangan pada partikel solid .....	11
Gambar 2.5 Aliran gas Solid yang melewati bend 90 .....	14
Gambar 2.6 Empat Contoh bentuk Injection Air .....	15
Gambar 2.7 Penampang pada elbow vertikal .....	16
Gambar 2.8.Separasi aliran pada elbow .....	17
Gambar 2.9 Aliran ideal melalui belokan .....	21
Gambar 2.10 Aliran sekunder .....	22
Gambar 2.11 Geometri alat eksperimental ( $Ac, Ma$ ) .....	23
Gambar 2.12 Bentuk mesh yang dipakai $Ac, Ma$ .....	24
Gambar 2.13 Pressure Gardien dan variasi density $Ac, Ma$ .....	25
Gambar 2.14 Grafik Hubungan Pressure gradient dengan ukuran Ash .....	26
Gambar 2.15 Grafik Hubungan pressure gradient dengan ukuran radius bend .....	27



Gambar 2.16 Profile Velociti magnitude pada penampang membujur bend .....	27
Gambar 2.17 Grafik minimum velocity magnitude fase gas pada semua penampang melintang yang dilalui aliran gas-solid .....	28
Gambar 2.18 Coeffisien pressure pada bend searah aliran gas solid .....	28
Gambar 2.19 Distribusi penyebaran partikel pada penampang melintang .....	51
Gambar 2.20 Grafik <i>average DPM concentration</i> pada aliran <i>gas- solid</i> $\alpha = 0.75$ .....	53
Gambar 3.1 Diagram alir penelitian .....	54
Gambar 3.2 Desain Pemodelan dan Ukuran pada Pipa elbow vertical .....	56
Gambar 3.3 Desain Pipa injeksi 45° dan 90° Dengan R/D 1 Pada Gambit .....	58
Gambar 3.4 Desain Pipa injeksi 45° dan 90° Dengan R/D 1,5 Pada Gambit .....	59
Gambar 3.5 Desain Pipa injeksi 45° dan 90° Dengan R/D 1,5 Pada Gambit .....	60
Gambar 3.6 Meshing Pada Inlet Pipe injeksi 90° dengan R/D=1,5 .....	62
Gambar 3.7 Meshing Pada Elbow Pipe injeksi 90° dengan R/D=1,5 .....	64
Gambar 3.8 Meshing pada full model injeksi 90° dengan R/D=1,5 .....	66
Gambar 3.10 Surface pengambilan data .....	66

Gambar 3.11 Surface pengambilan data pada model R/D 2 tanpa adanya injeksi .....	66
Gambar 3.12 diagram Alir Hasil Simulasi Penelitian .....	70
Gambar 4.1 Velocity Pathline Tanpa Injeksi .....	75
Gambar 4.2 Contur Velocity Magnitude Tanpa Injeksi pada tiap tiap penampang surface elbow.....	77
Gambar 4.3 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 1 .....	78
Gambar 4.4 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 1 pada tiap tiap penampang surface elbow .....	80
Gambar 4.5 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 1 .....	80
Gambar 4.6 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 1 pada tiap tiap penampang surface elbow .....	82
Gambar 4. 7 Grafik Perbandingan Avg Velocity Tanpa injeksi dan Injeksi 45 dan 90 R/D 1.....	83
Gambar 4.8 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 1,5 .....	84
Gambar 4.9 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 1,5 pada tiap tiap penampang surface elbow .....	86
Gambar 4.10 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 1,5 ...	86
Gambar 4.11 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 1,5 pada tiap tiap penampang surface elbow .....	88
Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Avg Velocity Tanpa injeksi dan Injeksi 45 dan 90 R/D 1,5 .....	89
Gambar 4.13 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 2 .....	90

Gambar 4.14 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 2 pada tiap tiap penampang surface elbow .....	92
Gambar 4.15 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 2 .....	92
Gambar 4.16 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 2 pada tiap tiap penampang surface elbow.....	94
Gambar 4. 17 Grafik Perbandingan Avg Velocity Tanpa injeksi dan Injeksi 45 dan 90 R/D 2 .....	95
Gambar 4.18 Contur Velocity Pathline Tanpa Injeksi .....	98
Gambar 4.19 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel <i>Solid</i> Pada Dinding <i>Elbow</i> dan Pipa tanpa injeksi di tiap-tiap penampang surface elbow .....	100
Gambar 4.20 Contur Velocity Pathline Injeksi 45 R/D 1 .....	101
Gambar 4.21 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel <i>Solid</i> Pada Dinding <i>Elbow</i> dan Pipa injeksi 45 dan R/D 1 di tiap-tiap penampang surface elbow....	102
Gambar 4.22 Contur Velocity Pathline Injeksi 45 R/D 1 .....	103
Gambar 4.23 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel <i>Solid</i> Pada Dinding <i>Elbow</i> dan Pipa injeksi 90 dan R/D 1 di tiap-tiap penampang surface elbow....	104
Gambar 4.24 grafik perbandingan average DPM concentration tanpa ada injeksi dengan injeksi 45 dan 90 dengan R/D 1.....	105
Gambar 4.25 Contur DPM concentration pada penampang surface pipa Injeksi 45 R/D 1.5.....	107
Gambar 4.26 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel <i>Solid</i> Pada Dinding <i>Elbow</i> dan Pipa injeksi 45 dan R/D 1,5 di tiap-tiap penampang surface elbow .	109

Gambar 4.27 Contur DPM concentration pada penampang surface pipa Injeksi 90 R/D 1.5 .....	110
Gambar 4.28 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel <i>Solid</i> Pada Dinding <i>Elbow</i> dan Pipa injeksi 45 dan R/D 1,5 di tiap-tiap penampang surface elbow ....	111
Gambar 4.29 grafik perbandingan average DPM concentration tanpa ada injeksi dengan injeksi 45 dan 90 dengan R/D 1,5.....	112
Gambar 4.30 Contur DPM concentration pada penampang surface pipa Injeksi 45 R/D 2 .....	114
Gambar 4.31 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel <i>Solid</i> Pada Dinding <i>Elbow</i> dan Pipa injeksi 45 dan R/D 2 di tiap-tiap penampang surface elbow .....	115
Gambar 4.32 Contur DPM concentration pada penampang surface pipa Injeksi 90 R/D 2 .....	116
Gambar 4.33 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel <i>Solid</i> Pada Dinding <i>Elbow</i> dan Pipa injeksi 90 dan R/D 2 di tiap-tiap penampang surface elbow .....	118
Gambar 4.34 grafik perbandingan average DPM concentration tanpa ada injeksi dengan injeksi 45 dan 90 dengan R/D 2 .....	119
Gambar 4.35 Contur Distribusi Penyebaran Partikel <i>Solid</i> Pada Dinding <i>Elbow</i> dan Pipa di tiap-tiap penampang surface setelah elbow 1 dan elbow 2 .....	122
Gambar 4.36 grafik perbandingan average DPM concentration tiap surface setelah elbow 1 dan elbow 2.....	122

## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbedaan dense dan Dilute Phase .....	17
Tabel 2.2 Harga $\phi$ .....	34
Tabel 2.3 Persamaan-persamaan didalam software CFD ..	34
Tabel 3.1 Model Numerik yang digunakan .....	61
Tabel 3.2 Properties Udara Pembawa .....	63
Tabel 3.3 Properties Flyash .....	63
Tabel 3.4 Setting Injection Tipe .....	64
Tabel 3.5 Kriteria tahap processing .....	64
Tabel 3.6 Analisa Grid Independansi .....	65

## DAFTAR SIMBOL

$\nu$	: viscositas kinematic
$D_d$	: diameter partikel (m)
$U$	: kecepatan (m/s)
$U_f$	: kecepatan gesek (m/s)
$A$	: Luas frontal ( m <sup>2</sup> )
$\rho$	: densitas fluida ( kg/m <sup>3</sup> )
$U$	: kecepatan relatif partikel terhadap fluida ( m/s)
$C_D$	: koefisien gaya <i>drag</i>
$W$	: berat partikel
$F_{\text{buoyancy}}$	: gaya apung partikel
$F_{\text{drag}}$	: gaya drag oleh udara
$U_{\text{pt}}$	: kecepatan terminal (m/s)
$\mu$	: viscositas dinamik ( m/s)
$d_p$	: diameter partikel (m)
$D_p$	:diameter pipa (m)
$\rho_p$	: <i>density</i> partikel (kg/m <sup>3</sup> )
$\rho$	: <i>density</i> gas ( kg/m <sup>3</sup> )

# **BAB I**

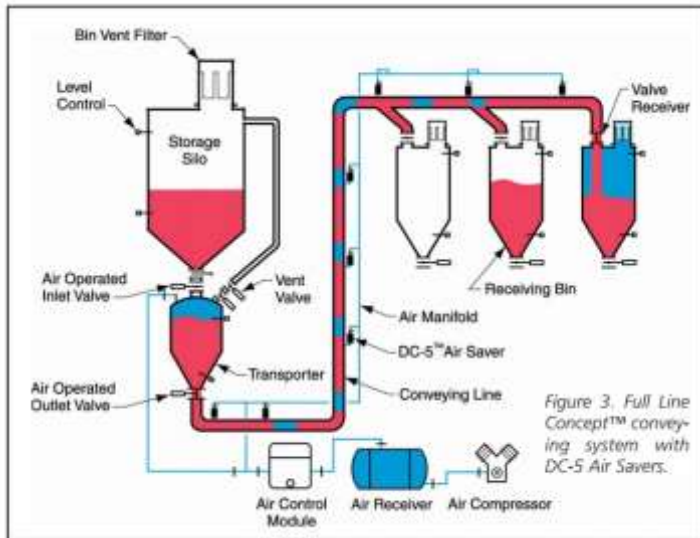
## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Dalam duni industri alat pemindahan bahan ada berbagai macam, salah satunya adalah Pneumatik Conveyor. Pneumatik Conveyor disebut juga air conveyor digunakan untuk memindahkan material curah dengan memanfaatkan aliran udara dalam pipa. Prinsip umum cara kerja dari semua jenis pneumatic konveyor adalah gerak pindah dari material dihasilkan oleh aliran yang cepat dari udara atau mempengaruhi material curah sehingga dapat berpindah seperti berpindahnya cairan didalam pipa.

Pesawat pneumatic banyak digunakan dalam industri seperti pemindahan antara gudang untuk loading dan unloading dari kapal laut, penyimpanan dalam hopper atau silo. Pemindahan material curah dengan aliran udara dalam pipa memiliki kelebihan seperti: material dipindah dengan ruangan yang tertutup (pipa) sehingga kerugian karena hilangnya material kecil, sedikit menimbulkan debu, pemakaian ruang yang ekonomis, mudah dalam perubahan arah dari pipa sehingga perubahan arah pemindahan juga mudah, sedikit pelayanan dari operasinya, dan tidak banyak bagian yang bergerak, dan dapat bekerja secara otomatis..

Contoh Skema Pneumatik Konveyor sistem tekan ditunjukkan oleh **Gambar 1.1**



**Gambar 1.1 Pneumatik Conveyor**

Kerugian dalam penggunaan pneumatik konveyor biasanya adalah besarnya daya yang dibutuhkan untuk pemindahan material per volume. Semakin cepat aus bagian-bagian conveyor apabila material yang dipindahkan bersifat abrasiv, serta kurang bagus untuk pemindahan material yang lembab, mudah menggumpal atau material yang lengket. (Arie yuwono). Salah satu kasus kasus yang banyak terjadi dalam sistem pneumatic conveying , adalah penurunan laju aliran akibat endapan (clogged) yang terjadi pada elbow (Pype Bend) sistem perpipaan. Sehingga membuat laju aliran didalam pipa pneumatik konveyor menurun.

Dalam pembangkit listrik, *pneumatic conveyor* digunakan untuk mengangkut *fly ash* ( abu batubara) dari plant ke *diposal area* ( area pembuangan limbah). Sistem ini dipilih karena dinilai aman untuk mengangkut material debu,tidak membutuhkan banyak ruang, dan pemindahan dapat dilakukan ke berbagai sudut



dan arah. Untuk memungkinkan memindahkan material dengan berbagai sudut dan arah maka digunakan *bend* ( belokan ) untuk mengubah arah aliran material bercampur udara di dalam pipa, hal ini memungkinkan pipa pembawa dapat di pasang di lantai, melekat pada dinding, menggantung pada langit-langit, sehingga memungkinkan untuk pengangkutan yang fleksibel.

Dari segi bentuk, *bend* memiliki bentuk yang sederhana sehingga tidak banyak mendapat perhatian padahal *bend* dapat menyebabkan berbagai masalah dalam sistem pengangkutan. Salah satu yang sering terjadi pada *bend* adalah material akan mengendap pada dinding pipa sehingga menimbulkan penyumbatan pada sistem perpipaan. Hal ini dapat menghentikan kinerja dari rangkaian sistem *pneumatic conveyor* dan dapat menyebabkan *compressor* bekerja terlalu berat , oleh karena itu terjadinya *clogged* ( penyumbatan ) harus sebisa mungkin di hindari. Salah satu cara yang digunakan untuk meminimalisasikan terjadinya *clogged* adalah dengan menggunakan *pressurized air assisted* dimana pada sistem ini udara tambahan akan diinjeksikan pada tempat-tempat yang rawan terjadi penyumbatan. Dalam sistem penginjeksian *pressurized air assisted* ini udara tambahan dimasukan sesaat sebelum aliran *gas-solid* memasuki *radius bend* dengan membentuk sudut dengan arah aliran *gas-solid*. Dimana dalam penelitian ini akan dilakukan investigasi mengenai sudut datang antara *assisted air* dengan arah aliran *gas-solid* dengan membuat variasi sudut datang  $45^\circ$  dan  $90^\circ$  serta variasi  $R/D = 1$ ,  $R/D = 1,5$ , dan  $R/D = 2$ . Dengan aliran yang memiliki perbandingan volume partikel dengan volume udara masing-masing 0.5 untuk mendapatkan sistem transfer *fly ash* yang paling reliabilitasnya tinggi.

Penelitian mengenai Penurunan Laju Kecepatan pada Pneumatik Conveyor beberapa diantaranya

**Ac.Ma** (2010) meneliti tentang Karakteristik aliran pada aliran multifasa *gas-padat* dalam pneumatik conveyor untuk

memprediksi tekanan dalam pipa. Pengaruh dari ukuran partikel, densitas partikel, dan rasio radius *bend* pada penurunan tekanan selama berada pada *bend* pipa juga dianalisis. Percobaan dilakukan untuk mendapatkan tekanan statis di bagian tertentu dari pneumatik conveyor dengan panjang pipa 26 m dan diameter bagian dalam 53 mm. Materi yang dibawa adalah flyash dengan ukuran partikel rata-rata 30 mm dan rasio padatan pemuatan berada di kisaran 20-70. Sebuah studi numerik aliran gas-padat dalam sistem tiga dimensi dilakukan dengan cara CFD software Fluent 6.3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan Eulerian. Hasil yang dihitung dari gradien tekanan, dengan kemiringan 0,781 untuk pipa lurus horisontal pertama dan 1,017 untuk *bend* horisontal. Didapatkan bahwa gradien tekanan meningkat dengan meningkatnya diameter partikel secara cepat dan mencapai nilai puncak ketika diameter partikel mencapai 150 mm, dan kemudian mulai menurun dan menunjukkan kenaikan sedikit dengan peningkatan diameter partikel dengan nilai lebih besar dari 150 mm. Peningkatan pada hasil densitas partikel dalam peningkatan tekanan gradien. *Pressure drop* jauh lebih kecil bila ketinggian nol. Gradien tekanan yang melintasi *bend* horisontal meningkat secara bertahap dengan peningkatan kekasaran. Semakin besar konstanta kekasaran didefinisikan, maka akan semakin besar penurunan tekanan. Gradien tekanan pada *bend* menurun secara signifikan ketika rasio radius *bend* meningkat dari 1 sampai 3, dan kemudian perlahan-lahan bertambah untuk rasio radius *bend* 3-6. Dengan peningkatan kecepatan yang berbeda-beda, *pressure drop* menurun pada awalnya, setelah 0,2-0,3 m, tekanan berkurang dalam jumlah yang sama.

**Sariadi** (2015) meneliti tentang studi numerik mengenai *dense phase pneumatic conveyor* dengan tambahan *pressurized air assisted* pada bend 90° dengan variasi fraksi volume solid 0.25 ; 0.5 dan 0.75, serta besar sudut injeksi  $\Theta = 30^\circ$  dan  $\Theta = 45^\circ$  hasil dari analisa kecepatan udara pembawa pada aliran gas-solid yaitu penambahan *air assisted* dapat menambah kecepatan dari aliran gas pada daerah dekat dinding *radius* dalam *bend*. Sedangkan pada

bagian penampang membujur sebelum adanya injeksi *air assisted* (1-D before inlet bend) profile kecepatan sama untuk semua kasus baik sebelum adanya injeksi *air assisted* dan pada saat sudah ditambah *air assisted* serta meningkatkan *velocity magnitude* pada masing-masing penampang melintang pada *bend*, hal ini disebabkan karena dengan penambahan *air assisted* dapat menambah momentum aliran *gas-solid* saat melewati *bend* sehingga kehilangan momentum saat melewati *bend* dapat direduksi. Kecepatan udara di dekat dinding pipa pada sisi *radius* dalam *bend* lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan udara di dekat dinding pipa pada sisi *radius* luar *bend*. Kecepatan yang rendah di dekat dinding pipa pada sisi *radius* luar *bend* disebabkan oleh terjadinya olakan pada daerah tersebut karena adanya *adverse pressure gradient* yang terjadi pada aliran pada daerah tersebut. *Adverse pressure gradient* yang terjadi karena adanya peristiwa aliran fluida yang seolah-olah melewati sebuah *nozzle* dan *diffuser* secara berurutan. Pada saat aliran fluida melewati area dengan penyempitan luas penampang akan mengalami kenaikan kecepatan dan penurunan tekanan, sedangkan ketika aliran melewati penampang yang mengalami perluasan penampang maka aliran fluida akan mengalami penurunan kecepatan dan mengalami kenaikan tekanan. Kenaikan tekanan ini akan membuat aliran fluida akan mengalir dari daerah yang mempunyai tekanan rendah ke daerah yang mempunyai tekanan tinggi, peristiwa ini dinamakan *adverse pressure gradient*, *adverse pressure* ini akan menyebabkan *back flow* yang kemudian akan menyebabkan separasi pada daerah dekat dinding pipa.

## 1.1 Rumusan Masalah

Dari studi literatur yang telah dilakukan didapatkan bahwa *bend* (belokan) mempunyai pengaruh yang besar terhadap kinerja

seluruh sistem transfer *fly ash* salah satunya adalah bend akan menyebabkan *pressure drop* yang besar pada aliran *gas-solid* dan dapat menyebabkan terjadinya *clogged* pada aliran. Terjadinya *clogged* ini menyebabkan beberapa kerugian diantaranya kebutuhan daya yang berlebihan, beban *compressor* yang akan naik secara drastis dan bisa juga menyebabkan sistem akan berhenti beroperasi. *Clogged* terjadi karena partikel *solid* membentur dinding *bend* pada sisi *radius* luar sehingga menyebabkan partikel kehilangan momentum dan kecepatan sehingga akan mengendap pada dinding *bend*. Setelah terjadi pengendapan pada dinding sisi luar *bend* akan diikuti dengan pembentukan endapan kedua pada sisi dalam bend pada *wake area* dikarenakan timbunan pertama yang terjadi membuat aliran *gas-solid* seperti melewati *nozzle* dan *diffuser* karena ada penyempitan dan pembesaran luas penampang aliran secara tiba-tiba. Adanya pemberasan penampang laluan *gas-solid* ini akan menyebabkan terjadinya *pressure gradient* pada aliran *gas-solid*, yang kemudian akan menyebabkan terjadinya *wake*. Pada daerah *wake* ini aliran *gas solid* bergerak membentuk pusaran yang menyebabkan partikel kehilangan momentum aliran dan membuat partikel *solid* akan mengendap pada daerah tersebut.

Oleh karena itu menarik untuk di teliti bagaimana cara untuk mengurangi kasus *clogged* ini pada aliran *gas-solid* yang melewati *bend*. Salah satunya dengan digunakan *pressurized air assisted* untuk mengatasi masalah *clogged* pada sistem perpipaan. Penambahan *pressurized air assisted* di arahkan ke endapan *solid* agar dapat meningkatkan *momentum* partikel yang mengendap, sehingga partikel yang mula-mula diam akan mengalami kenaikan kecepatan dan mulai bergerak kembali. Selanjutnya partikel *solid* yang sudah mempunyai kecepatan ini akan terbawah oleh aliran udara pembawa sampai semua endapan habis terbawah kembali oleh udara pembawa dan *clogged* yang ada dapat dihilangkan.

Dalam menginjeksi *pressurized air assisted* alirannya di arahkan dengan variasi sudut  $90^\circ$  dan  $45^\circ$  terhadap arah aliran gas

solid agar di ketahui sudut mana yang efektif untuk mengatasi *clogged* yang terjadi. Berdasarkan penjumlahan vector dapat dilihat bahwa sudut injeksi dengan memiliki sudut injeksi yang kecil akan memberikan resutan kecepatan yang paling tinggi, dengan demikian dapat di perkirakan bahwa sudut injeksi yang lebih kecil akan memberikan efek reduksi terhadap endapan solid yang paling efektif. Sehingga dalam penelitian ini akan mengambil rumusan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh penambahan *pressurized air assisted* terhadap perilaku aliran *gas-solid* yang melewati *bend* dibandingkan dengan tidak adanya penambahan *pressurized air assisted* pada elbow dengan  $R/D = 2 = 8in$  ?
2. Bagaimana perilaku aliran *gas-solid* yang terjadi dengan sudut injeksi *pressurized air assisted* dengan aliran *gas-solid* dengan variasi sudut  $90^\circ$  dan  $45^\circ$  dan variasi Radius kelengkungan elbow  $R/D = 1 = 4 in, R/D = 1,5 = 6 in$ , dan  $R/D = 2 = 8 in$  ?
3. Bagaimana perilaku aliran *gas-solid* yang terjadi pada kedua sudut injeksi yang digunakan dan variasi Radius kelengkungan elbow  $R/D = 1 = 4 in, R/D = 1,5 = 6 in$ , dan  $R/D = 2 = 8 in$  untuk aliran dengan fraksi volume *solid*  $0.5$  ?
4. Berapakah sudut Injeksi yang lebih efektif mengurangi endapan partikel solid dalam elbow dengan variasi Radius kelengkungan elbow  $4 in, 6 in$ , dan  $8 in$ ?

## 1.2 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian tugas akhir ini untuk mengetahui karakteristik aliran dua fase pada *pneumatic conveying* yang melalui *bend*  $90^\circ$  dengan dan tidak adanya penambahan *pressurized air assisted* . Maka tugas akhir ini memfokuskan pada beberapa hal berikut ini antara lain:

1. Mengetahui perilaku yang terjadi pada aliran *gas-solid* yang melewati bend yang memiliki sudut kelengkungan  $90^\circ$  dengan radius kelengkungan 4in, 6in, dan 8in dengan internal diameter 4 in tanpa dan dengan adanya tambahan *pressurized air assisted* pada aliran *gas-solid* dengan fraksi volume solid 0.5.
2. Mengetahui perilaku yang terjadi pada aliran *gas-solid* yang melewati *bend* yang memiliki sudut kelengkungan  $90^\circ$  dengan radius kelengkungan 4in, 6in, dan 8in dengan internal diameter 4 in dengan adanya tambahan *pressurized air assisted* dengan variasi sudut ijeksi  $90^\circ$  dan  $45^\circ$  terhadap arah aliran *gas-solid* dengan fraksi volume solid 0.5.
3. Membandingkan bagaimana *pressurized air assisted* terhadap pola aliran *gas-solid* yang melewati *bend* yang memiliki sudut kelengkungan  $90^\circ$  dengan radius kelengkungan 4in, 6in, dan 8in dengan internal diameter 4 in dengan vasiasi sudut injeksi  $90^\circ$  dan  $45^\circ$  dengan fraksi volume solid 0.5.
4. Menentukan sudut injeksi air assisted yang paling efektif untuk mengurangi endapan partikel solid.

### 1.3 Batasan Masalah

Beberapa batasan dan asumsi yang digunakan dalam penelitian ini antara lain adalah:

1. Fluida kerja merupakan fluida udara sebagai incompressible flow dengan densitas  $\rho$  viskositas dinamik  $\mu$  konstan
2. Aliran udara yang melewati radiused bend diasumsikan steady flow
3. Besarnya laju *pressurized air assisted* yang diinjeksikan kedalam aliran gas solid adalah konstan

4. Partikel fly ash diasumsikan seragam dan berbentuk bola
5. Pengaruh perpindahan panas akibat gesekan antara fluida campuran (antara udara dan partikel solid) pada bend diabaikan
6. Simulasi komputasi dilakukan dengan software Fluent 6.3.26

## **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diperoleh dari penelitian ini antara lain:

1. Pemberikan pemahaman tentang aliran *gas-solid* dengan fraksi volume solid 0.5. yang mengalir melalui *bend 90°* dengan radius kelengkungan 4 in, 6 in, dan 8 in dengan internal diameter 4 in
2. Memberikan pemahaman tentang terjadinya proses pengendapan partikel solid saat melewati *bend 90°* engan radius kelengkungan 4in, 6in, dan 8in dengan internal diameter 4 in
3. Memberikan penjelasan mengenai modifikasi dengan penambahan *air assisted* terhadap reduksi dari endapan patikel yang terjadi saan aliran *gas-solid* melewati *bend 90°* engan radius kelengkungan 4in, 6in, dan 8in dengan internal diameter 4 in.

## **1.5 Sistematika Penulisan Tugas Akhir**

Sistematika penulisan tugas akhir ini disusun sebagai berikut:

### *Bab I Pendahuluan*

Bab ini berisi tentang latar belakang, perumusan masalah, tujuan penelitian, batasan masalah, dan manfaat dari penelitian yang dilakukan.

### *BAB II Tinjauan Pustaka*

Bab ini dibagi menjadi 3 bagian, yaitu dasar teori *gas-solid flow*, aliran fluida yang melewati *elbow*, dan penelitian terkait yang sudah ada. Dasar teori berisi semua hal yang menunjang dalam menganalisa hasil penelitian. Sedangkan penelitian terkait yang sudah ada berisi tentang penelitian-penelitian sebelumnya yang ada korelasinya dengan penelitian kali ini dan sebagai penunjang dalam analisa data.

### *Bab III Metode Penelitian*

Bab ini menerangkan tentang langkah-langkah pemodelan dengan menggunakan perangkat lunak *fluent 6.3.26*, geometri dari *bend* serta modifikasi penambahan injeksi *air assisted*, serta alokasi waktu penelitian.

### *Bab IV Analisa Dan Pembahasan*

Bab ini berisi tentang hasil-hasil numerik (*post processing*) kualitatif dan kuantitatif berupa *DPM concentration* dan *velocity magnitude* yang kemudian dianalisa dan didiskusikan lebih lanjut.

### *Bab V Penutup*

Bab penutup ini terdiri dari kesimpulan dari hasil numerik (*post processing*) dan saran yang perlu diberikan untuk penelitian selanjutnya.



*Halaman Kosong*

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Dasar Teori Gas-Solid Flow**

##### **2.1.1 Abu Terbang (*Fly Ash*) Hasil Pembakaran**

Pada sebuah sistem pembangkit listrik tenaga uap, batubara yang dibakar di dalam *furnace* tidak mungkin dapat terbakar secara keseluruhan. Kompleksitas unsur-unsur yang terkandung dalam batubara seperti  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , dll. Sangat memungkinkan terdapat bagian batubara yang tidak dapat terbakar. Mineral batubara yang tidak dapat terbakar tersebut disebut *coal ash* atau abu batubara, dimana secara umum batubara mempunyai kandungan abu sebesar 2% -30%.

Fly ash batubara adalah material yang memiliki ukuran butiran yang halus berwarna keabu-abuan dan diperoleh dari hasil pembakaran batubara. Pada pembakaran batubara dalam PLTU, terdapat limbah padat yaitu abu layang (*fly ash*) dan abu dasar (*bottom ash*). Partikel abu yang terbawa gas buang disebut fly ash, sedangkan abu yang tertinggal dan dikeluarkan dari bawah tungku disebut bottom ash. Di Indonesia, produksi limbah abu dasar dan abu layang dari tahun ke tahun meningkat sebanding dengan konsumsi penggunaan batubara sebagai bahan baku pada industri PLTU (Harijono D, 2006). Presentase abu terbang (*fly ash*) adalah 80%-90 % dari keseluruhan abu batubara yang dihasilkan dan sisanya akan menjadi abu dasar (*bottom ash*). Abu terbang *fly ash* berasal dari abu pembakaran batubara yang keluar bersama dengan gas buang dan terkumpul di dalam ESP (*electrostatic precipitator*) yang berfungsi sebagai filter, sebelum akhirnya dibuang ke *disposal area*.

Partikel abu terbang secara umum berbentuk butiran dengan ukuran  $0,5\ \mu\text{m}$  hingga  $200\ \mu\text{m}$  dan berwarna abu-abu. Massa jenis abu terbang berkisar antara  $700\ \text{kg/m}^3$  hingga  $1150\ \text{kg/m}^3$ . Kandungan utama abu terbang adalah *silicon dioksida* ( $\text{SiO}_2$ ), Aluminium oksida ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) dan besi dioksida ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), disamping abu terbang juga mengandung beberapa logam berat. Oleh karena itu abu terbang dapat dimanfaatkan sebagai bahan campuran pembuatan semen



**Gambar 2.1** Partikel abu batubara. (a) *fly ash* dan (b) *bottom ash*.

*Bottom ash* atau abu dasar merupakan sisa pembakaran batu bara yang terkumpul didasar ruang bakar boiler dan di tampung di dalam sebuah *hopper* di bagian bawah boiler, sebelum di buang ke *disposal area*. Secara fisik, abu dasar menyerupai butiran pasir kasar yang berwarna gelap berdiameter 2 mm hingga 10 mm. Massa jenis abu dasar berkisar antara  $700\ \text{kg/m}^3$  hingga  $1600\ \text{kg/m}^3$  dengan *specific gravity* 2,1 hingga 2,7. Komposisi kimia yang dimiliki abu dasar sedikit lebih kompleks daripada abu terbang, yaitu diantaranya *silica*, alumina, dan besi dengan presentase kecil kalsium, magnesium, dan sulfat. Kualitas batubara yang dibakar sangat menentukan komposisi kimia abu dasar yang akan dihasilkan. Dengan kandungan kimia yang dimiliki itu abu dasar banyak dimanfaatkan untuk bahan campuran pembuatan aspal dan paving.

### **2.1.2 Sistem Pengangkutan Abu Terbang ( *Fly Ash Conveying Sistem* )**

ESP (*electrostatic precipitator*) digunakan untuk menyaring dan memisahkan abu terbang dari gas buang sebelum dibuang ke udara, dimana untuk berikutnya abu terbang dibuang ke penampungan (*disposal area*). Permasalahan yang kemudian muncul adalah jarak yang cukup jauh antara penampungan dan boiler. Hal ini menyebabkan kebutuhan akan efektifitas dan efisiensi proses pengangkutan, serta kebutuhan akan keamanan.

Dalam proses pengangkutan abu batubara membutuhkan pertimbangan yang matang. Oleh karenanya mekanisme pengangkutan ini banyak dilakukan dengan sistem perpipaan. Agar butiran batubara dimana yang dibahas dalam analisa perancangan ini adalah abu terbang (*fly ash*) dapat bergerak di sepanjang pipa, dibutuhkan media pendorong atau pembawa. Berdasarkan jenis media pendorongnya yaitu udara, sistem pengangkutan abu terbang melalui pipa ini biasanya digunakan sistem pneumatik (Pneumatik Konveyor).

Klasifikasi Pneumatik Konveyor menurut bahan yang di pindahkan terdiri dari 2 yaitu Pneumatik conveyor dilute phase, dan Pneumatik konveyor dense phase.

- *Dilute phase pneumatic conveyor*

Bahan yang ditranfer pneumatik conveyor berada pada fase cair, sebaliknya apabila pada kecepatan rendah dan tidak bertekanan dapat dikatakan berada pada fase padat.

- *Dense phase pneumatic conveyor*

Bahan yang ditranfer pneumatik conveyor memiliki permeabilitas yang baik

Berdasarkan sistem operasinya, pneumatik konveyor dibedakan menjadi 2, yaitu: operasi dengan sistem hisap dan operasi dengan sistem tekan, atau sebagian dengan menggunakan sistem hisap sebagian operasinya menggunakan

sistem tekan. Pada sistem hisap, material dipindahkan pada udara yang renggang (Vacuum) dan pada sistem tekan material dipindah oleh udara tekan. Pada sistem gabungan atau kombinasi, kedua sistem tersebut terpisah pada dua bagian dengan satu kompresor.

### 2.1.3 Sistem Pengangkutan Dengan Sistem *Pneumatic*

Sistem ini memanfaatkan udara bertekanan untuk mendorong butiran abu batubara sehingga bergerak di sepanjang pipa hingga ke penampungan. Udara bertekanan ini selanjutnya disebut dengan fluida pendorong atau fluida primer, dibangkitkan oleh *compressor* udara.

### 2.1.4 *Solid Loading Ratio*

*Solid loading ratio* dapat didefinisikan sebagai perbandingan laju aliran massa padat ( $\dot{m}_p$ ) terhadap laju aliran massa gas ( $\dot{m}_g$ ).

$$SLR = \frac{\dot{m}_p}{\dot{m}_g} \dots\dots\dots (2.1)$$

Jenis pola aliran yang terjadi sangat tergantung pada perbandingan laju massa padat dengan laju massa udara (*solid loading ratio*). Pada pola *dilute phase* terjadi jika SLR rendah, jika SLR tinggi maka pola aliran menuju ke *dense phase*. Sehingga SLR ini memberikan indikasi tentang konsentrasi padatan dalam campuran.

### 2.1.5 Fraksi Volume

Fraksi volume dapat didefinisikan sebagai perbandingan volume massa padat ( $V_p$ ) terhadap laju aliran massa gas ( $V_g$ ) ditambah dengan volume massa padat ( $V_p$ ).

$$\alpha = \frac{V_p}{V_g + V_p} \dots\dots\dots (2.2)$$

Jenis pola aliran yang terjadi sangat tergantung pada fraksi volume. Pada pola *dilute phase* terjadi jika fraksi volume rendah dibawah 0.1, jika volume fraksi tinggi maka pola aliran menuju ke *dense phase*. Sehingga fraksi volume ini memberikan indikasi tentang konsentrasi padatan dalam campuran

### 2.1.6 Aliran Gas-Solid

Aliran yang terdiri dari fase gas dan solid di dalamnya memiliki aliran yang berbeda. Aliran yang memiliki fase gas dan solid yang mengalir diklasifikasikan atas aliran bertipe *dense phase* dan *dilute phase*. Dalam penentuan dan pendefinisian tipe aliran tersebut masih terdapat beberapa penafsiran khususnya untuk pendefinisian tipe *dense phase*.

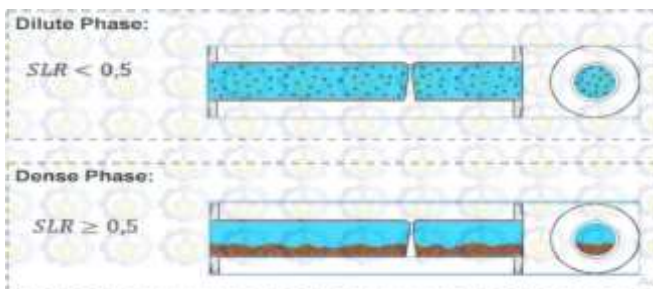
### 2.1.7 Dense dan dilute phase flow

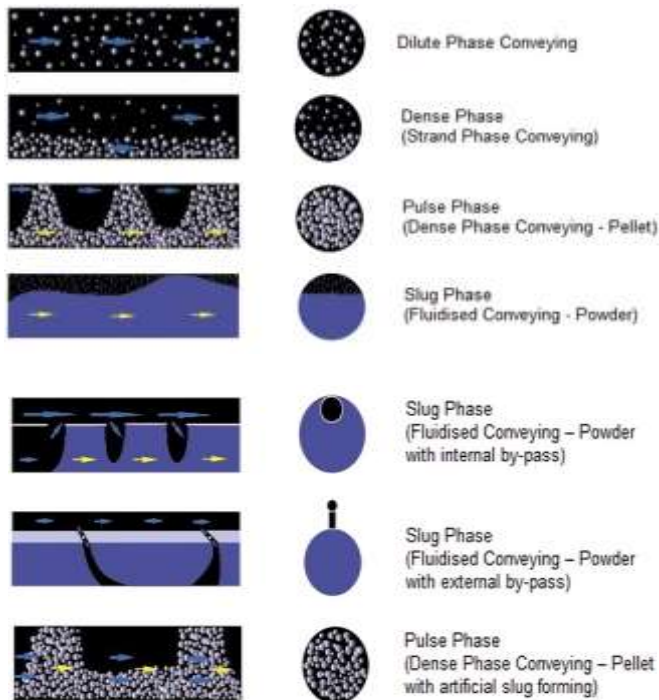
Dalam penafsiran aliran tipe *dense flow* terdapat pengertian yang umum digunakan oleh para ahli. Pengertian ini akan memberikan batas tertentu apakah aliran itu bertipe *dense* atau *dilute phase*. Suatu aliran dapat di kategorikan sebagai aliran *dense phase* menurut definisi yang di berikan oleh para ahli :

1. Aliran multiphase dapat dikategorikan sebagai *dilute phase flow* saat nilai *solid loading ratio* kurang dari 15 (david mills, 2003).
2. Konsentrasi volume partikel yang padat pada suatu kapasitas aliran yang bernilai lebih besar dari 40 atau 50 persen ( Chen dkk.;1979)
3. Pemindahan partikel solid oleh gas ( *pneumatic conveying*) yang mengalir melalui suatu sistem pipa yang penuh dengan partikel solid ( Konrad dkk.;1980).

Secara umum perbedaan antara aliran *dense* dan *dilute* tertera pada tabel 2.1 berikut: **Tabel 2.1** Perbedaan aliran *dilute* dan *dense phase*

Parameter	Aliran dilute	Aliran dense
Gerakan relative antar partikel	Besar	Kecil
Interaksi antar partikel	Lemah	Kuat
Tampakan viskositas partikel	Berkaitan hanya dengan interaksi partikel - gas	Berkaitan dengan interaksi partikel-gas dan interaksi antar partikel
Solid loading ratio	<15	>15
Kecepatan udara pembawa	Tinggi (> 3m/s biasanya (8-12 m/s))	Rendah (< 3 m/s)





**Gambar 2.2** Visualisasi perbedaan dilute dan dense phase

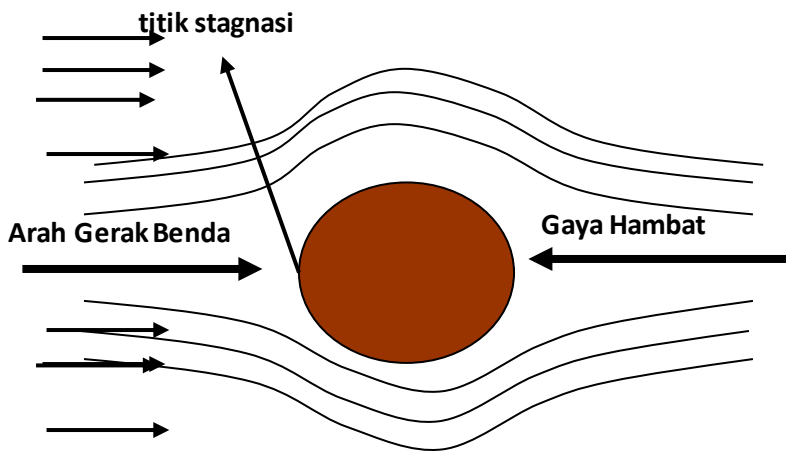
Dalam membedakan analisa *dense* dan *dilute phase* seperti divisualisasikan pada gambar 2.2 ,hal yang penting untuk diamati adalah terjadinya interaksi antar partikel. Pada aliran *dense phase* interaksi yang terjadi antar partikel tidak dapat diabaikan seperti pada aliran *dilute phase*. Interaksi antar partikel yang terjadi akan menyebabkan partikel bergerak dengan kecepatan yang tidak stabil. Ketidak stabilan tersebut terjadi antara lain disebabkan adanya tumbukan antar partikel dan gaya van der Waals sehingga untuk memprediksi dari sifat aliran yang ada memerlukan analisa yang lebih kompleks. Selain itu selama dalam laluan terjadi gradient tekanan yang drastis karena adanya timbunan-timbunan partikel yang memunpuk



sehingga dapat timbul efek '*choking*' atau aliran seperti tersedak. Timbunan aliran ini terjadi karena partikel telah berada pada kecepatan *settling*-nya serta adanya gaya Tarik antar molekul yang membentuk suatu ikatan sehingga partikel tersebut menimbun

### 2.1.8 Gaya Hambat ( Drag Force)

Pada saat sebuah partikel bergerak relative terhadap aliran fluida di sekitarnya seperti pada gambar 2.3 maka akan terjadi gaya tahan pada gerakan partikel tersebut yang disebut gaya *drag*. Pada kondisi steady persamaan gaya drag pada partikel adalah:



**Gambar 2.3** gaya hambat pada benda yang melaju.

$$F_D = \frac{\rho \cdot C_D \cdot A \cdot U^2}{2} \quad \text{,,,(2.3)}$$

Dimana :  $A$  = Luas frontal ( $\text{m}^2$ )

$\rho$  = densitas fluida ( $\text{kg/m}^3$ )

$U$  = kecepatan relatif partikel terhadap fluida ( $\text{m/s}$ )

$C_D$  = koefisien gaya *drag*.

Gaya *drag* selain menyebabkan terjadinya gaya yang melawan dari arah kecepatannya juga terjadi gaya angkat (*lift force*). Gaya angkat ini sangat penting dalam industry dirgantara untuk menerbangkan sebuah pesawat. Namun dalam penelitian ini nantinya gaya angkat tersebut tidak diperhatikan atau diabaikan mengingat analisa utama dalam penelitian ini adalah separasi partikel dari gas yang mengalir di dalam pipa.

Gaya drag sangat dipengaruhi oleh koefisien drag ( $C_D$ ). Sedangkan koefisien drag sangat dipengaruhi oleh tipe aliran yang ditentukan dari nilai bilangan Reynold ( $Re$ ) dan bentuk partikel atau benda yang dianalisa. Bentuk-bentuk seperti bola, balok, maupun bentuk profil lain memiliki nilai koefisien *drag* yang berbeda.

### 2.1.9 Kecepatan Superficial Gas (*Superficial Gas Velocity*)

Kecepatan superficial gas ( $U_g$ ) didefinisikan sebagai volume gas persatuan waktu ( $V_g$ ) dibagi menjadi luas penampang saluran pipa ( $A$ )

$$U_g = \frac{v_g}{A} = \frac{\dot{m}_g}{A \rho_g} \dots\dots\dots (2.4)$$

### 2.1.10 Pressure Drop

Dalam *transport* aliran gas-padat, penting dalam mengevaluasi penurunan tekanan (*pressure drop*) yang terjadi untuk memperkirakan *power consumption*. Dalam *pneumatic*

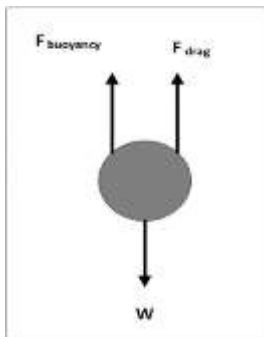
*conveying system*, partikel biasanya dimasukan ke gas pembawa dan dipercepat oleh aliran gas. *The power consumption* (penurunan tekanan persatuan panjang pipa) untuk percepatan patikel dapat menjadikan terlalu signifikan nilainya dibandingkan dengan kondisi aliran *fully developed*. Selain itu *pressure drop* pada saat aliran melewati belokan dan percabangan akan tinggi dikarenakan adanya perlambatan aliran ( tumbukan partikel dangan dinding)

### 2.1.11 Minimum Transport Velocity

Pergerakan vertikal dari pertikel padatan didalam aliran horizontal dipengaruhi oleh perbandingan antara kecepatan terminal ( $U_{pt}$ ) dengan kecepatan gesek ( $U_f$ ). (*Blatch*, 1906; *Chien and asce*, 1956). Pada circular pipe, kecepatan rata-rata dapat ditentukan dari kecepatan gesek oleh [*Taylor*, 1954]

#### ➤ Particle terminal velocity ( $U_{pt}$ )

Kondisi dimana suatu aliran *gas-solid* saat partikel solid dalam keadaan diam pada kecepatan tertentu, maka kecepatan maksimal agar partikel tersebut dalam kondisi terminal ( tidak bergerak) dinamakan kecepatan terminal. Kecepatan terminal sangat dipengaruhi oleh gaya hambat yang dialami partikel dan nilai Reynolds partikel tersebut:



Dalam keadaan diam maka di ketahui bahwa resultan ketiga gaya yang bekerja pada partikel harus bernilai nol

Dimana :

$W$  = berat partikel

$F$  = gaya apung partikel

**Gambar 2.4** Gambar keseimbangan gaya pada partikel solid

dimana :

$$U_{pt} = \frac{R_{et} \mu}{\rho U_{pt}} \dots\dots\dots (2.7)$$

Sehingga dari keseimbangan gaya diperoleh formulasi sebagai berikut:

$$V (\rho_p - \rho) g = C_D \frac{\pi \mu^2}{8 \rho} R_{et}^2 \dots\dots\dots (2.8)$$

Hubungan antara  $C_D$  dan  $Re_t$  diberikan oleh persamaan berikut [schlichting,1979]

$$\begin{aligned} 1. C_D &= \frac{24}{R_{et}} & R_{et} < 2 \\ 2. C_D &= \frac{18.5}{R_{et}^{0.6}} & 2 < R_{et} < 500 \\ 3. C_D &= 0.44 & 500 < R_{et} < 2 \times 10^5 \dots\dots (2.9) \end{aligned}$$

Dengan menggabungkan persamaan 2.7 dengan persamaan 2.8 didapatkan hasil sebagai berikut:

- $Re_t < 2$

$$U_{pt} = \frac{d_p^2 (\rho_p - \rho) g}{18 \rho \nu}$$

- $2 < Re_t < 500$

$$U_{pt}^{1.4} = 0.072 \frac{d_p^{1.6} (\rho_p - \rho) g}{\rho^{0.4} \mu^{0.6}}$$

- $500 < Re_t < 2 \times 10^5$

$$U_{pt}^2 = 3.03 \frac{d_p (\rho_p - \rho) g}{\rho} \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan :  $U_{pt}$  = kecepatan terminal (m/s)

$d_p$  = diameter partikel (m)

$\mu$  = viscositas dinamik ( kg /m.s)

$\rho_p$  = *density partikel* ( kg /m<sup>3</sup>)

$\rho$  = *density gas* ( kg/m<sup>3</sup>)

$Re_t$  = *Reynold number* partikel

➤ *Friction velocity zero solid concentration* (  $U_{f0}$  )

$$U_{f0}^{1.4} = \frac{U_{pt}}{4.9 \left( \frac{d_p}{D_p} \right) \left( \frac{D_d \rho}{\mu} \right)^{0.4} \left( \frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right)^{0.23}} \dots\dots\dots (2.11)$$

Keterangan :

$U_{f0}$  = kecepatan pada saat *zero solids concentration*  
(m/s)

$U_{pt}$  = kecepatan terminal (m/s)

$\mu$  = viscositas dinamik ( m/s)

$d_p$  = diameter partikel (m)

$D_p$  = diameter pipa (m)

$\rho_p$  = *density* partikel (kg/m<sup>3</sup>)

$\rho$  = *density gas* ( kg/m<sup>3</sup>)

➤ *Friction velocity* (  $U_f$  )

$$U_f = U_{f0} \left[ 1 + 2.8 \left( \frac{U_{pt}}{U_{f0}} \right)^{\frac{1}{3}} \sqrt{\alpha_p} \right] \dots\dots\dots (2.12)$$

Keterangan :  $U_{f0}$  = kecepatan pada saat *zero solids concentration* ( m/s)

$\alpha_p$  = fraksi volume partikel ( % )

$U_{pt}$  = kecepatan terminal ( m/s)

➤ *Minimum transport velocity* (  $U_0$  )

$$U = U_f \left[ 5 \log \left( \frac{D_d U}{\nu} \right) - 3.90 \right] \dots\dots\dots (2.13)$$

Keterangan :

$\nu$  = viscositas kinematic

$D_d$  = diameter partikel (m)

$U$  = kecepatan (m/s)

$U_f$  = kecepatan gesek (m/s)

➤ *Pressure Drop Per Unit Length* (  $\Delta P/L$  )

$$\frac{\Delta P}{L} = [\alpha_p \cdot \rho_p + (1 - \alpha_p) \rho] \frac{U_f^2}{D_d} \dots\dots\dots (2.14)$$

Keterangan :  $U_f$  = kecepatan gesek (m/s)

$\alpha_p$  = rata-rata volume fraksi partikel ( % )

$\rho_p$  = *density* partikel ( kg/m<sup>3</sup> )

$\rho$  = *density* gas ( kg/m<sup>3</sup> )

$D_d$  = diameter partikel (m)

### 2.1.12 Slip velocity

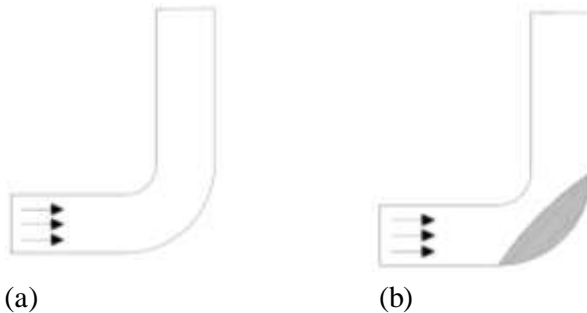
*Slip velocity* adalah perbedaan antara kecepatan dari partikel *solid* dengan kecepatan dari udara pembawa. Besarnya *slip velocity* ini tergantung pada ukuran diameter dari *solid*, massa jenis *solid*, dan bentuk geometri dari *solid* yang transfer. Pada pengangkutan partikel *solid* melalui lintasan yang *horizontal* besarnya kecepatan *solid* yang terbawa aliran gas biasanya 90 % dari kecepatan udara pembawa untuk material *solid* dengan ukuran diameter 20 mikron. Sedangkan untuk kasus yang sama untuk partikel dengan ukuran kira-kira 1000 mikron kecepatan dari partikel *solid* akan turun hingga mencapai 50 % dari kecepatan udara pembawanya.

Pada kasus khusus dimana yang diangkut adalah material dengan ukuran partikel yang kecil (*fine powders*) biasanya digunakan besarnya *slip velocity* 15 % untuk aliran yang melalui lintasan *horizontal* dan 25 % untuk aliran yang melalui lintasan *vertical*. (David Mills , 2001)

### 2.1.13 Clogging ( Penyumbatan)

*Clogging* (penyumbatan) adalah fenomena terhentinya aliran *gas-solid* yang melewati pipa dikarenakan adanya tumpukan dari *solid* yang mengendap di dinding pipa. Pada *bend* sendiri pengendapan ini terjadi karena partikel *solid* membentur dinding sehingga akan mengalami penurunan dari momentum partikel *solid* yang berakibat pada berkurangnya kecepatan dari partikel *solid*. Ada beberapa dari partikel *solid* yang bahkan memiliki kecepatan nol sesaat setelah membentur dinding *bend* sehingga membuat partikel *solid* jatuh ke dinding *bend* pada jari-jari luar. Lama-lama partikel *solid* yang jatuh ini akan menumpuk pada bagian dinding *bend* pada radius bagian luar sehingga akan mempersempit lintasan yang dilalui oleh *gas-solid*. Lintasan yang menyempit ini seolah-olah membentuk konfigurasi seperti *nozzle* dan *diffuser*. Karena *gas-solid* melewati saluran seperti konfigurasi

*nozzle* dan *diffuser* maka akan terjadi *secondary clogging* pada bagian dinding pada jari-jari dalam *bend* tepatnya pada bagian akhir dari *wake* yang terbentuk oleh aliran yang melewati panampang menyempit dan membesar secara tiba-tiba.

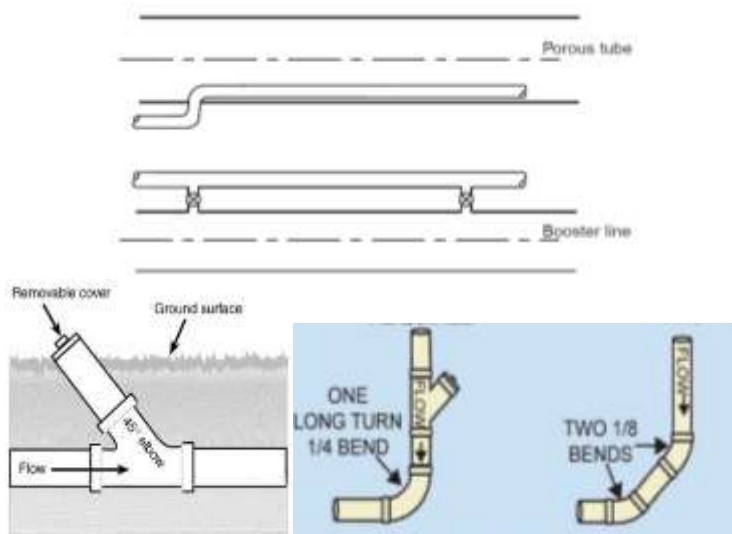


**Gambar 2.5** Aliran *gas-solid* pada *bend Vertikal*  $90^\circ$  (a) Sebelum terjadi *clogging*, (b) Setelah terbentuk *clogging* utama

#### 2.1.14 Air Injection Sistem / Pressurized Air Assisted

*Air injection* sistem merupakan salah satu cara untuk mereduksi terjadinya *clogged* pada aliran *gas-solid* yang melewati suatu *pipe line*. Cara kerja sistem ini adalah dengan memasukan udara tambahan dengan tekanan tinggi ke titik-titik yang sering terjadi *clogged*. Dengan sistem ini partikel solid dengan kecepatan rendah tidak akan sempat mengendap pada suatu titik tertentu. Karena sebelum terjadi pengendapan partikel solid terlebih dahulu di percepat kembali menggunakan udara tambahan dengan tekanan tinggi. Dengan sistem ini terjadinya *clogged* pada *pipeline* dapat di reduksi seminimal mungkin.





**Gambar 2.6** Empat contoh bentuk air injection. (david mill,2004)

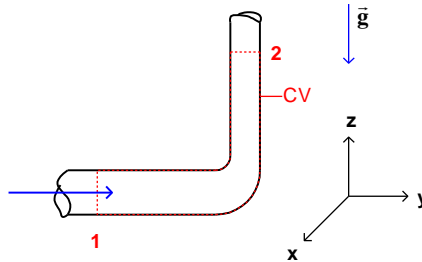
## 2.2 Aliran di Dalam Pipa

Pada sistem *ducting* ataupun perpipaan, *elbow* merupakan bagian yang menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan arah aliran fluida yang dapat menyebabkan terjadinya separasi dan juga *secondaryflow*. Akan dijelaskan lebih lanjut tentang mekanisme terjadinya separasi dan *secondaryflow* di dalam elbow.

### 2.2.1 Persamaan Energi pada Aliran Dalam Pipa

Pipa merupakan alat transportasi fluida yang sangat murah, pipa memiliki berbagai ukuran dan bentuk penampang. Penurunan tekanan aliran didalam pipa sangat penting untuk diketahui guna merancang sistem perpipaan. Kekasaran pipa, panjang pipa, diameter pipa, jenis fluida, kecepatan dan bentuk aliran adalah hal yang sangat terkait dengan penurunan tekanan (Pressure Drop),

Pada sistem *ducting* ataupun perpipaan, *elbow* merupakan bagian yang menyebabkan terjadinya *pressure drop* yang cukup besar. Hal tersebut dikarenakan adanya perubahan arah aliran fluida yang dapat menyebabkan terjadinya separasi dan juga *secondary flow*.



**Gambar 2.7** Penampang pada Elbow

### Persamaan Dasar

$$\dot{Q} - \dot{W}_s - \dot{W}_{shear} - \dot{W}_{other} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CS} (e + pv) \rho \vec{V} \cdot d\vec{A} \quad \dots\dots\dots(2.15)$$

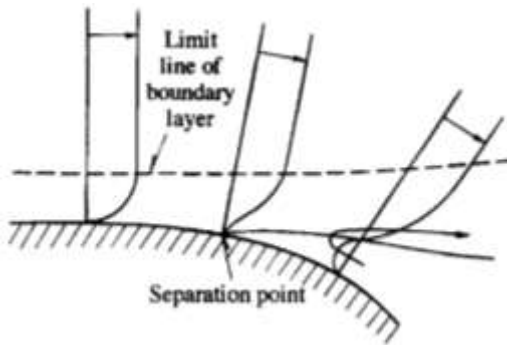
$$e = u + \frac{V^2}{2} + gz$$

Dengan Asumsi

1. Aliran Steady
2. Aliran incompressible
3. Energi dalam dan tekanan seragam pada penampang 1 dan 2

### 2.2.2 Mekanisme Terjadinya Separasi Aliran

Dalam sebuah aliran dimana tekanan mengalami penurunan searah dengan arah aliran, fluida akan mengalami percepatan dan lapisan batas menipis. Dalam suatu saluran yang mengalami kontraksi, tekanan memiliki gradien yang negatif yang dapat membuat aliran stabil sementara itu turbulensi secara bertahap menurun. Sebaliknya, hal-hal yang sangat berbeda dalam aliran yang memiliki gradien tekanan yang positif dimana tekanan meningkat searah dengan arah aliran, seperti pada aliran divergen atau aliran pada dinding yang melengkung seperti pada gambar 2.7.



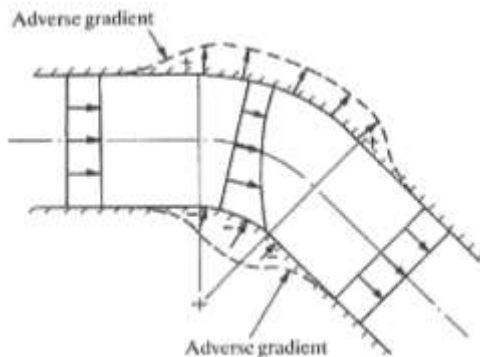
**Gambar 2.8** Separasi lapisan batas (Nakayama, 1999)

Pada gambar 2.7, terlihat bahwa fluida yang berjarak cukup jauh dari dinding memiliki kecepatan yang tinggi dan juga inersia yang besar. Oleh karena itu, aliran dapat melanjutkan ke arah *downstream* dan mampu juga untuk menghadapi tekanan *downstream* yang tinggi. Sedangkan fluida yang berdekatan dengan dinding memiliki kecepatan yang rendah, sehingga tidak dapat mengatasi tekanan untuk mencapai *downstream* karena hanya memiliki inersia yang kecil pula. Dengan demikian kecepatan aliran menjadi lebih kecil dan lebih kecil lagi hingga pada akhirnya gradien kecepatannya menjadi nol. Titik ini disebut sebagai titik separasi.

Setelah terjadinya separasi, gradien kecepatan menjadi negatif sehingga menghasilkan aliran balik (*backflow*). Dalam area sekitar titik separasi, suatu vortisitas akan berkembang dan aliran akan menjadi turbulen. Berkembangnya vortisitas menyebabkan terbentuknya *vortex*, adanya *vortex region* akan mengurangi luas penampang efektif yang dilalui aliran utama, sehingga aliran mengalami percepatan. Akibatnya terjadilah *pressure drop*. Untuk alasan ini, kerugian energi menjadi meningkat. Fenomena seperti inilah yang terjadi pada sebuah *elbow*, pada *elbow* aliran salah satu dinding akan menjauhi arah aliran, bahkan dapat terjadi dengan tiba-tiba.

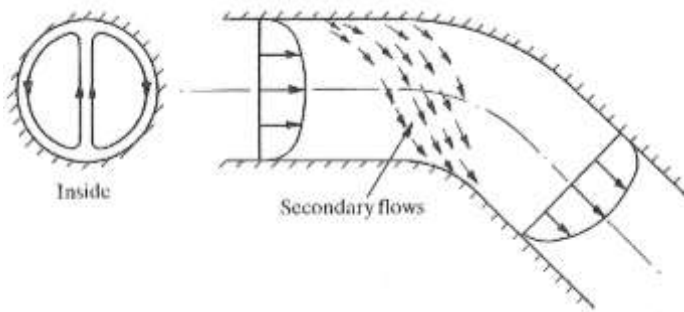
### 2.2.3 Mekanisme Terjadinya Aliran Sekunder di Dalam *Elbow*

Aliran yang melalui *elbow* tentunya akan berubah arah, begitu pula dengan tekanan statis dan distribusi kecepatannya pun akan ikut berubah, setidaknya dua *adverse pressure gradient* akan timbul seperti yang terlihat pada gambar 2.8. Setelah itu aliran sekunder akan muncul dan lengkungan akan menyebabkan turbulensi pada struktur aliran.



**Gambar 2.9** Aliran ideal melalui belokan (*Miller, 1990*)

Pada *elbow*, kecepatan bervariasi dari nol pada dinding hingga maksimum pada daerah inti, aliran aktual melalui belokan melibatkan distribusi energi yang tidak *uniform*. Perbedaan distribusi ini terjadi pada sisi *inner* dan *outer wall*, hal ini terjadi terjadi karena semakin kesisi luar maka tekanan statis akan semakin besar. Perbedaan tekanan pada kedua sisi inilah yang menyebabkan aliran yang melewati *elbow* tidak sepenuhnya mengikuti aliran utama. Aliran sekunder ini merupakan fenomena aliran tiga dimensi seperti yang diilustrasikan pada gambar 2.9.



**Gambar 2.10** Aliran sekunder (Miller, 1990)

Namun lain halnya dengan aliran sekunder yang terjadi pada *square elbow*. Pada *square elbow* mempunyai karakter khusus jika dibandingkan *circular elbow* dengan terjadinya aliran sekunder pada sisi sudut. Aliran sekunder terjadi karena pada *square elbow* terjadi *boundary layer* pada sisi bawah dan samping sedangkan pada *circular elbow* tidak dijumpai. Interaksi *boundary layer* yang berkembang pada sisi bawah dan samping inilah yang menyebabkan terjadinya aliran sekunder.

## 2.3 CFD (Computational Fluid Dynamics)

Untuk memahami CFD, pertama-tama mari kita bagi dua kata-kata *Computational Fluid Dynamics*, menjadi sebagai berikut :

- *Computational* : segala sesuatu yang berhubungan dengan matematika dan metode numeric atau komputasi
- *Fluid Dynamics* : dinamika dari segala sesuatu yang mengalir. Ditinjau dari istilah diatas, CFD bisa berarti suatu teknologi komputasi yang memungkinkan untuk mempelajari dinamika dari benda-benda atau zat-zat yang mengalir. Secara definisi CFD adalah ilmu yang mempelajari cara memprediksi aliran fluida, perpindahan panas, reaksi kimia, dan fenomena lainnya dengan menyelesaikan persaman-persamaan matematika (model matematika).

Pada dasarnya, persamaan-persamaan pada fluida dibangun dan dianalisis berdasarkan persamaan-persamaan diferensial parsial ( PDE = *Partial Differential Equation* ) yang merepresentasikan hukum-hukum konservasi massa, momentum, dan energy. Sebenarnya CFD mengganti persamaan-persamaan diferensial parsial dari kontinuitas, momentum, dan energy dengan persamaan-persamaan aljabar. CFD merupakan pendekatan dari persoalan yang asalnya kontinu (memiliki jumlah sel tak terhingga) menjadi model yang diskrit (jumlah sel terhingga). Jadi CFD memprediksi aliran berdasarkan :

- Model matematika (persamaan diferensial parsial), khususnya memecahkan persamaan Navier-Stokes.
- Metode numeric (teknik solusi dan diskritisasi)
- *Tools* perangkat lunak (*solvers, tools preprocessing, dan postprocessing*)

Berikut adalah bentuk persamaan umum yang digunakan pada CFD, yang nantinya bisa merepresentasikan hukum-hukum konservasi massa, momentum, dan energy.

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \phi dV}_{\text{unsteady}} + \underbrace{\oint_A \rho \phi \mathbf{V} \cdot d\mathbf{A}}_{\text{convection}} = \underbrace{\oint_A \Gamma \nabla \phi \cdot d\mathbf{A}}_{\text{diffusion}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{generation}} \quad \dots\dots\dots(2.16)$$

Dimana  $\phi$  adalah properti untuk sembarang system per satuan massa, seperti terlihat pada table berikut :

**Tabel 2.2 Harga  $\phi$**

Persamaan	$\phi$
Kekekalan massa	1
x-momentum	U
y-momentum	V
z-momentum	W
Kekekalan energi	E

### **2.3.1 Manfaat CFD**

Terdapat tiga hal yang menjadi alasan kuat kenapa menggunakan CFD, yaitu :

1. *Insight* artinya CFD memberikan pemahaman dan detail yang mendalam tentang sebuah system atau alat yang mana mengalami kesulitan untuk membuat *prototype*-nya.
2. *Foresight* artinya CFD memberikan informasi secara menyeluruh tentang desain yang optimal, dengan cara mengubah kondisi batasnya.
3. *Efficiency* artinya penelitian menggunakan CFD lebih efisien dibandingkan dengan eksperimen karena bisa menghemat biaya dan waktu.

### **2.3.2 Proses Simulasi CFD**

Pada umumnya terdapat tiga tahapan yang harus dilakukan ketika melakukan CFD, yaitu : *preprocessing*, *solving*, dan *postprocessing*. Berikut ini adalah penjelasan dari tiap tahapan :

1. *Preprocessing*

*Preprocessing* merupakan langkah pertama ketika akan menganalisa sebuah model CFD. Teknisnya adalah membuat model dalam paket CAD (*Computer Aided Design*), membuat mesh yang cocok/sesuai, kemudian menerapkan kondisi batas dan sifat-sifat fluidanya.

2. *Solving*

*Solvers* (program inti pencari solusi) CFD menghitung kondisi-kondisi yang diterapkan pada saat *preprocessing*.

3. *Postprocessing*

*Postprocessing* adalah langkah terakhir dalam analisi CFD. Hal yang dilakukan pada langkah ini adalah mengorganisasi dan menginterpretasi data hasil simulasi CFD yang bisa berupa gambar, kurva, dan animasi.

### 2.3.3 Kondisi Batas

Berikut ini adalah beberapa kondisi batas yang tersedia dalam piranti lunak simulasi CFD komersial antara lain:

#### 2.3.3.1 *Flow inlet dan exit boundaries*

- ***Pressure inlet***: kondisi batas ini biasa digunakan untuk mendefinisikan tekanan fluida pada aliran pada *inlet*, beserta dengan seluruh properti aliran lainnya. Kondisi batas ini sesuai untuk perhitungan aliran *incompressible* maupun *compressible*. Kondisi batas *pressure inlet* dapat digunakan ketika tekanan *inlet* diketahui namun laju aliran tidak diketahui. Situasi ini muncul dalam banyak situasi praktis, termasuk aliran *bouyancy-driven*. Kondisi batas ini juga dapat digunakan untuk mendefinisikan pada batas “bebas” dalam aliran eksternal.
- ***Velocity inlet***: kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan kecepatan aliran, beserta dengan seluruh properti aliran skalar yang relevan pada *inlet*



aliran. Properti *total* (stagnasi) dari aliran tidak tetap, jadi akan meningkat terhadap nilai apapun yang diperlukan untuk menyediakan distribusi kecepatan yang diinginkan. Kondisi batas ini dimaksudkan untuk aliran *incompressible*, dan kondisi ini berguna dalam aliran *compressible* yang akan mengarahkan ke hasil nonfisik karena kondisi ini mengizinkan kondisi stagnasi pada halangan *solid*, karena hal ini dapat menyebabkan properti *inflow stagnation* menjadi sangat tidak seragam.

- **Mass flow inlet:** kondisi batas ini digunakan untuk menyediakan laju aliran massa yang telah dirumuskan atau distribusi fluks massa pada *inlet*. Secara fisik, menentukan fluks massa memungkinkan tekanan total bervariasi dalam menanggapi solusi *interior*. Hal ini berbeda dengan kondisi batas *pressure inlet*, dimana tekanan total adalah tetap sedangkan fluks massa bervariasi.
- **Inlet vent:** kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan sebuah *inlet vent* dengan sebuah *loss coefficient* tertentu, arah aliran, *ambient pressure*, dan suhu ambien.
- **Intake fan:** kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan sebuah aliran eksternal dari *intake fan* dengan *pressure jump* tertentu, arah aliran, *ambient pressure*, dan *ambient temperature*.
- **Pressure outlet:** Kondisi batas ini membutuhkan spesifikasi dari tekanan statis (*gauge*) pada *outlet boundary*. Nilai dari tekanan statis yang telah ditentukan digunakan hanya ketika bekerja pada aliran *subsonic*, tekanan yang telah ditentukan tidak akan lagi digunakan, tekanan akan diekstrapolasikan dari aliran dalam *interior*. Seluruh kuantitas aliran lainnya diekstrapolasikan dari *interior*.

- ***Pressure far-field:*** kondisi batas ini digunakan dalam pemodelan kondisi aliran bebas tak hingga, dengan *free-stream Mach number* dan kondisi statis yang ditentukan. Kondisi batas ini seringkali disebut dengan kondisi batas karakteristik, karena menggunakan informasi karakteristik (*Riemann invariants*) untuk menentukan variabel aliran pada batas. Kondisi batas ini berlaku hanya jika kepadatan dihitung dengan menggunakan hukum gas ideal, selain itu tidak disarankan menggunakan kondisi batas ini.
- ***Outflow:*** kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan aliran keluar yang mana kecepatan aliran dan tekanannya tidak diketahui sebelum solusi masalah aliran dilakukan. Kondisi batas ini tidak dapat digunakan dalam kasus aliran *compressible*, aliran *unsteady* dengan densitas bervariasi meskipun merupakan aliran *incompressible*, dan masalah yang melibatkan kondisi batas *pressure inlet*.
- ***Outlet Vent:*** Kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan keluaran dari *vent* dengan sebuah *loss coefficient* tertentu, *ambient pressure*, dan *ambient temperature*.
- ***Exhaust fan:*** Kondisi batas ini digunakan untuk pemodelan keluaran dari *vent* dengan sebuah *pressure jump* tertentu, dan *ambient pressure*

### 2.3.3.2 *Wall, repeating, dan Pole boundaries*

- ***Wall:*** Kondisi batas ini digunakan untuk daerah fluida dan padat terikat. Dalam aliran viskos, kondisi batas tanpa slip diberlakukan pada dinding secara *default*, tetapi dapat juga menentukan komponen kecepatan tangensial dalam hal gerakan translasi atau rotasi dari

batas dinding, atau model “slip” dinding dengan menentukan gesekan.

- **Symmetry:** kondisi batas ini digunakan ketika ketertarikan geometri secara fisik, pola yang diekspektasikan dari solusi aliran/termal, memiliki kesimetrisan *mirror*. Kondisi ini dapat juga menggunakan model *zero-shear slip walls* dalam aliran viskos. Perlu berhati-hati dalam menentukan lokasi batas simetri. Pada garis tengah dari geometri *axisymmetric*, perlu digunakan tipe *axis boundary* dari pada kondisi batas simetris.
- **Periodic:** kondisi batas ini digunakan ketika geometri fisik yang diperhatikan dan pola perkiraan dari solusi aliran/termal mengalami pengulangan alami secara periodik. Pada piranti lunak tersebut terdapat dua tipe kondisi, yang pertama tidak mengizinkan *pressure drop* di *periodic planes*, sedangkan tipe kedua mengizinkan adanya *pressure drop* pada kondisi periodik secara translasional, memungkinkan model untuk menjadi aliran periodik “*fully-developed*”.
- **Axis:** kondisi batas ini harus digunakan sebagai garis tengah dari geometri *axisymmetric*. Hal ini juga dapat digunakan untuk garis tengah segi empat atau hexahedral jaringan silinder-polar. Definisi kondisi batas pada *axis boundaries* tidak diperlukan.

### 2.3.3.3 Internal cell zones

- **Fluid:** sebuah zona fluida merupakan sebuah kelompok sel yang mana seluruh persamaan aktifnya telah terungkap. Satu-satunya *input* yang diperlukan untuk zona fluida adalah tipe dari material fluida.
- **Solid:** sebuah zona *solid* merupakan sebuah kelompok sel yang mana hanya permasalahan konduksi kalor yang terpecahkan, tidak ada persamaan aliran yang

terungkap. Material diperlakukan seperti padatan atau juga seperti fluida, tetapi ini diasumsikan bahwa tidak terjadi konveksi. Satu-satunya *input* yang diperlukan untuk zona *solid* adalah tipe dari material *solid*. Haruslah diindikasikan bahwa material yang manakah yang terkandung zonda *solid*, sehingga properti material yang sesuai yang akan digunakan. Oilhan *input* memungkinkan untuk mengatur tingkat laju kalor bangkitan volumetris (*heat source*) atau nilai pasti dari suhu. Selain itu juga dapat menentukan pergerakan untuk zona *solid*. Jika terdapat batas periodik rotasional yang berdekatan dengan zona *solid*, perlu ditentukan sumbu rotasinya. Jika memodelkan radiasi menggunakan model DO, dapat ditentukan apakah ada atau tidak material yang berpartisipasi dalam radiasi.

#### **2.3.3.4 Internal face boundaries**

- **Fan:** model ini merupakan model parameter *lumped* yang dapat digunakan untuk menentukan dampak dari penggemar dengan karakteristik yang dikenal pada beberapa medan aliran yang lebih besar. Jenis batas *fan* yang memungkinkan untuk dapat memberikan *input* sebuah kurva *fan* empiris yang mana mengatur antara *head* (*pressure rise*) dan laju aliran (kecepatan) sepanjang sebuah elemen *fan*. Model *fan* tidak memberikan gambaran akurat mengenai rincian aliran melalui bilah *fan*. Sebaliknya memprediksi jumlah aliran melalui *fan*. *Fan* dapat digunakan dalam hubungannya dengan sumber aliran lain, atau sebagai satu-satunya sumber aliran dalam simulasi. Dalam kasus terakhir, laju aliran sistem ditentukan oleh keseimbangan antara kerugian dalam sistem dan kurva *fan*.

- **Radiator:** model ini merupakan sebuah model yang parameternya disamakan untuk elemen pertukaran panas (contoh: radiator atau kondensor), tersedia dalam piranti lunak ini. Jenis batas radiator memungkinkan anda untuk menentukan baik penurunan tekanan dan koefisien perpindahan panas sebagai fungsi dari kecepatan normal radiator.
- **Porous jump:** kondisi ini digunakan untuk model dengan “membran” tipis yang diketahui memiliki karakteristik kecepatan. Hal ini pada dasarnya adalah penyederhanaan satu dimensional dari model *porous media* yang tersedia untuk zona sel. Contoh penggunaan untuk kondisi *porous jump* meliputi pemodelan *pressure drop* melalui layar dan filter, dan pemodelan radiator bila tidak memerhatikan perpindahan panas. Model sederhana ini harus digunakan bila memungkinkan karena lebih kuat dan menghasilkan konvergensi yang lebih baik.
- **Wall:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan suatu permukaan menjadi dinding atau halangan.
- **Interior:** kondisi batas ini digunakan untuk mendefinisikan suatu permukaan menjadi *interior*, maksudnya adalah aliran mampu untuk melalui kondisi batas ini.

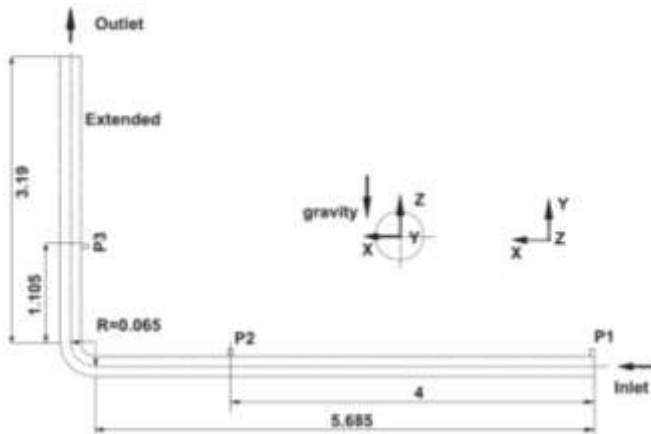
## 2.4 Penelitian Terdahulu

Berikut ini adalah beberapa penelitian terdahulu yang terkait dengan studi eksperimen pompa sentrifugal dan CFD *simulation* untuk impeller pada pompa sentrifugal :

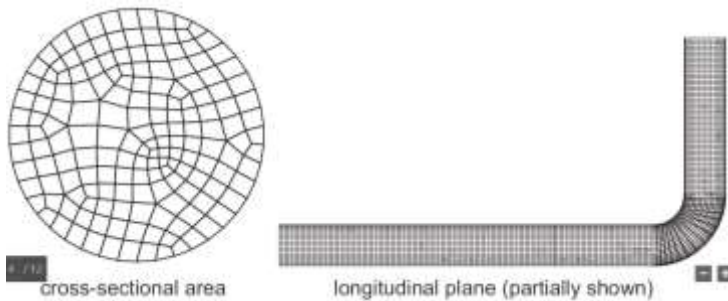
### 2.4.1 Ac.Ma, Dkk (2010)

**Ac.Ma (2010)** meneliti tentang Karakteristik aliran pada aliran multifasa *gas-padat* dalam pneumatik conveyor untuk memprediksi tekanan dalam pipa. Pengaruh dari ukuran

partikel, densitas partikel, dan rasio radius *bend* pada penurunan tekanan selama berada pada *bend* pipa juga dianalisis. Percobaan dilakukan untuk mendapatkan tekanan statis di bagian tertentu dari pneumatik conveyor dengan panjang pipa 26 m dan diameter bagian dalam 53 mm. Materi yang dibawa adalah flyash dengan ukuran partikel rata-rata 30 mm dan rasio padatan pemuatan berada di kisaran 20-70. Sebuah studi numerik aliran gas-padat dalam sistem tiga dimensi dilakukan dengan cara CFD software Fluent 6.3. Simulasi dilakukan dengan menggunakan pendekatan Eulerian. Hasil yang dihitung dari gradien tekanan, dengan kemiringan 0,781 untuk pipa lurus horisontal pertama dan 1,017 untuk *bend* horisontal. Didapatkan bahwa gradien tekanan meningkat dengan meningkatnya diameter partikel secara cepat dan mencapai nilai puncak ketika diameter partikel mencapai 150 mm, dan kemudian mulai menurun dan menunjukkan kenaikan sedikit dengan peningkatan diameter partikel dengan nilai lebih besar dari 150 mm. Peningkatan pada hasil densitas partikel dalam peningkatan tekanan gradien. *Pressure drop* jauh lebih kecil bila ketinggiannya nol. Gradien tekanan yang melintasi *bend* horisontal meningkat secara bertahap dengan peningkatan kekasaran. Semakin besar konstanta kekasaran didefinisikan, maka akan semakin besar penurunan tekanan. Gradien tekanan pada *bend* menurun secara signifikan ketika rasio radius *bend* meningkat dari 1 sampai 3, dan kemudian perlahan-lahan bertambah untuk rasio radius *bend* 3-6. Dengan peningkatan kecepatan yang berbeda-beda, *pressure drop* menurun pada awalnya, setelah 0,2-0,3 m, tekanan berkurang dalam jumlah yang sama.

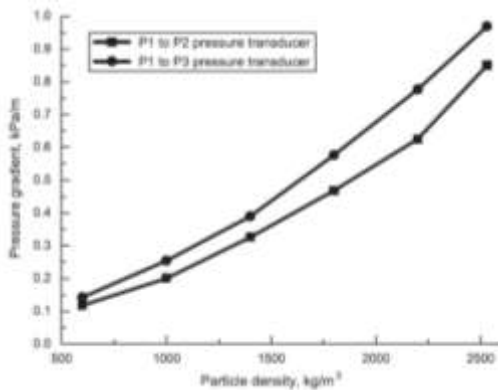


**Gambar 2.11** Geometri alat ekperimental.( A.C. Ma,2009)



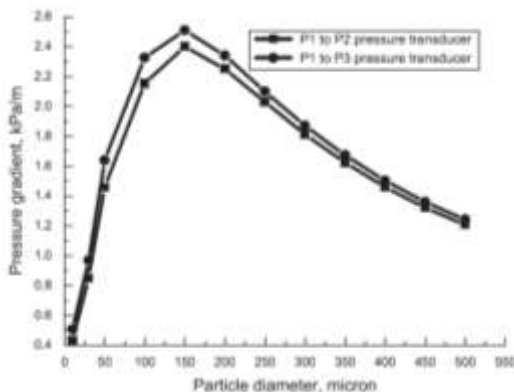
**Gambar 2.12** Bentuk mesh yang dipakai dalam pemodelan.(A.C. Ma,2009)

Hasil dari penelitian ini di tunjukan pada gambar 2.13 dan gambar 2.14 dan pada gambar 2.15 yang menunjukkan besarnya *pressure gradien* yang di timbulkan dengan memvariasikan besarnya ukuran dari diameter dan *density* partikel *ash* yang di bawah dan besar dari radius kelengkungan *bend*.



**Gambar 2.13** Pressure gradient pada variasi density fly ash.  
(A.C. Ma,2009)

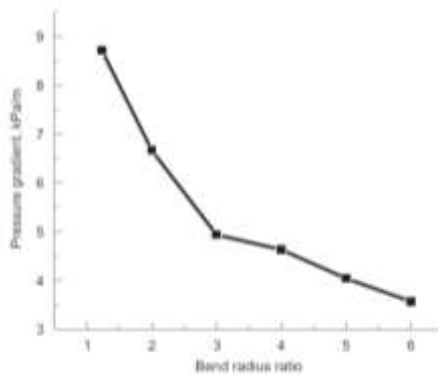
Pada gambar 2.19 Menggambarkan besarnya *pressure gradient* yang di timbulkan jika menggunakan *density fly ash* yang berbeda. Dari grafik dapat dilihat bahwa *pressure gradien* akan naik jika *density fly ash* yang di bawah semakin besar. Dari gambar dapat di simpulkan bahwa untuk mengangkut material dengan densitas yang lebih tinggi di butuhkan energi yang lebih besar.





**Gambar 2.14** Grafik hubungan pressure gradient dengan ukuran diameter ash. (A.C. Ma,2009)

Dari gambar 2.20 dapat dilihat bahwa *pressure gradient* yang di hasilkan akan naik pada titik tertentu dan kemudian turun dengan bertambahnya ukuran dari diameter partikel yang di bawa. *Pressure drop* yang di hasilkan akan mencapai puncak pada ukuran diameter *fly ash* 150 mikron dan kemudian turun pada ukuran diameter ash yang lebih besar.



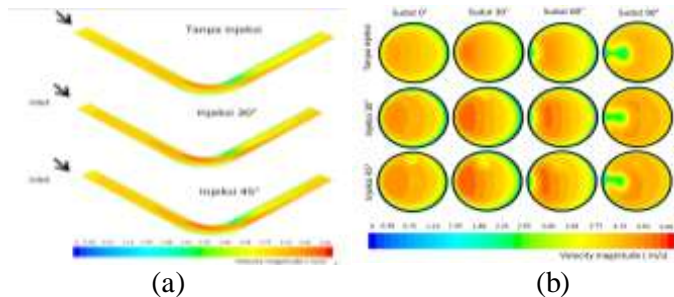
**Gambar 2.15** Grafik hubungan pressure gradient dengan ukuran radius bend yang digunakan. (A.C. Ma,2009)

Dari gambar 2.21 Dapat dilihat bahwa *pressure gradient* akan bernilai besar untuk radius kelengkungan bend yang kecil. Nilai *pressure gradient* akan menurun seiring dengan menambah jari-jari kelengkungan bend. Hal ini dapat terjadi karena pada saat aliran *gas-solid* melewati *bend* dengan radius kelengkungan yang besar maka perubahan arah aliran akan terjadi dengan perubahan yang perlahan-lahan sehingga akan mengurangi besarnya *pressure gradient* karena kehilangan memontum partikel yang sedikit dibandingkan pada saat melewati *radiused bend* dengan jari-jari kelengkungan yang lebih kecil.

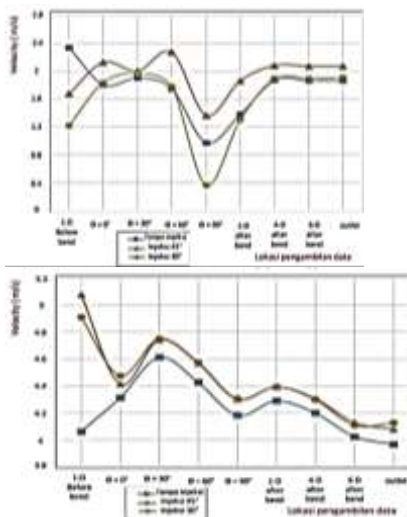
#### 2.4.2 Sariadi (2015)

Sariadi 2015 meneliti tentang studi numerik mengenai *dense phase pneumatic conveyor* dengan tambahan *pressurized air assisted* pada bend  $90^\circ$  dengan variasi fraksi volume solid 0.25 ; 0.5 dan 0.75, serta besar sudut injeksi  $\Theta = 30^\circ$  dan  $\Theta = 45^\circ$ . Dia melakukan pemodelan pada elbow horizontal dengan geometri ukuran *Internal diameter bend* 6 inchi Panjang pipa *inlet* 48 inchi. Panjang pipa *outlet* 48 inchi. Jarak titik ijeksi terhadap *inlet bend* 5 inchi. *Internal diameter injector pipe* 1 inchi hasil dari analisa kecepatan udara pembawa pada aliran gas-solid yaitu penambahan *air assisted* dapat menambah kecepatan dari aliran *gas* pada daerah dekat dinding *radius* dalam *bend*. Sedangkan pada bagian penampang membujur sebelum adanya injeksi *air assisted* (1-D *before inlet bend*) profile kecepatan sama untuk semua kasus baik sebelum adanya injeksi *air assisted* dan pada saat sudah ditambah *air assisted* serta meningkatkan *velocity magnitude* pada masing-masing penampang melintang pada *bend*, hal ini disebabkan karena dengan penambahan *air assisted* dapat menambah momentum aliran *gas-solid* saat melewati *bend* sehingga kehilangan momentum saat melewati *bend* dapat dikompensasi. Kecepatan udara di dekat dinding pipa pada sisi *radius* dalam *bend* lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan udara di dekat dinding pipa pada sisi *radius* luar *bend*. Kecepatan yang rendah di dekat dinding pipa pada sisi *radius* luar *bend* disebabkan oleh terjadinya olakan pada daerah tersebut karena adanya *adverse pressure gradient* yang terjadi pada aliran pada daerah tersebut. *Adverse pressure gradient* yang terjadi karena adanya peristiwa aliran fluida yang seolah-olah melewati sebuah *nozzle* dan *diffuser* secara berurutan. Pada saat aliran fluida melewati area dengan penyempitan luas penampang akan mengalami kenaikan kecepatan dan penurunan tekanan, sedangkan ketika aliran melewati penampang yang mengalami perluasan penampang maka aliran fluida akan mengalami penurunan kecepatan dan mengalami kenaikan tekanan. Kenaikan tekanan ini akan membuat aliran fluida akan mengalir dari daerah yang mempunyai tekanan rendah

ke daerah yang mempunyai tekanan tinggi, peristiwa ini dinamakan *adverse pressure gradient*, *adverse pressure* ini akan menyebabkan *back flow* yang kemudian akan menyebabkan separasi pada daerah dekat dinding pipa pada sisi *radius* dalam. seperti yang terlihat pada gambar



**Gambar 2.16** (a) *Profile velocity magnitude* pada penampang membujur *bend* . (b) *Profile kecepatan* pada penampang pada *bend* pada masing-masing variasi geometri

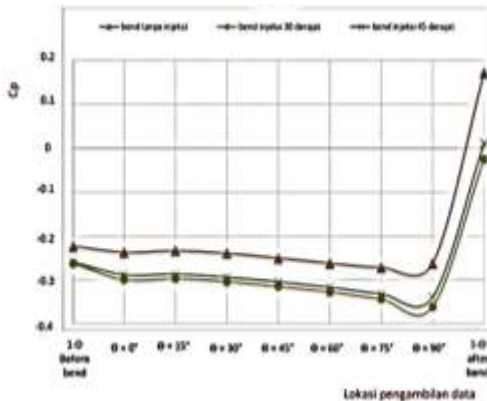


(a)

(b)

**Gambar 2.17** (a) Grafik *minimum velocity magnitude* fase gas pada semua penampang melintang yang dilalui aliran *gas-solid*. (b) Grafik *maximum velocity magnitude* fase gas pada semua penampang melintang yang dilalui aliran *gas-solid*.

kecepatan *maximum* yang didapatkan pada penelitian ini menunjukkan bahwa dengan menambahkan *air assisted* sebelum aliran *gas-solid* memasuki *bend* dapat meningkatkan *maximum velocity magnitude* pada masing-masing luas penampang baik sebelum masuk *bend*, saat *bend*, maupun setelah keluar dari *bend*. Sedangkan jika di bandingkan efek dari penambahan *air assisted* dengan sudut injeksi  $\Theta=30^\circ$  dan  $\Theta=45^\circ$  akan menghasilkan *maximum velocity* yang hampir sama pada semua penampang melintang.

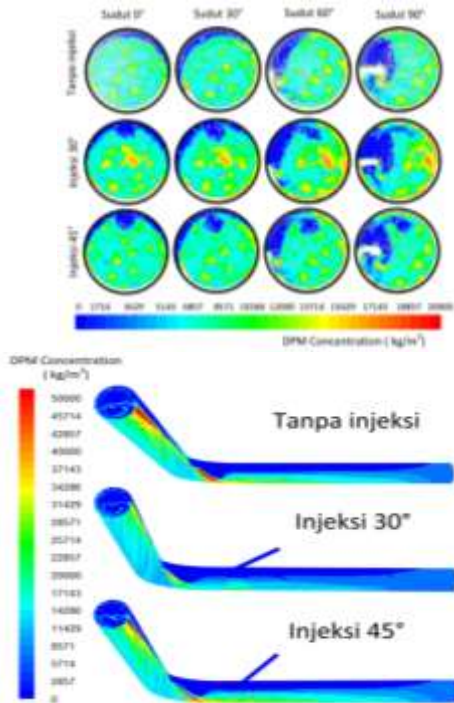


**Gambar 2.18** *Coefficient pressure* pada *bend* searah aliran *gas-solid*

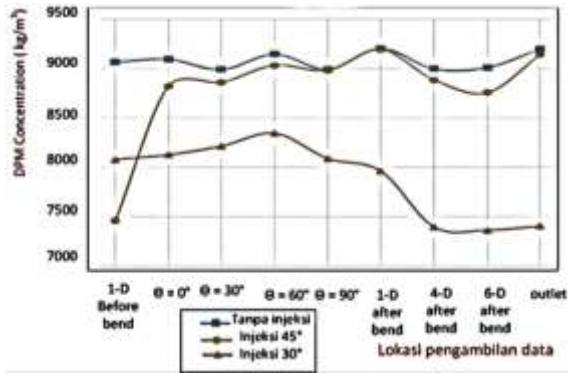
hasil *coefficient pressure* dari aliran udara yang mengalir melalui *bend*  $90^\circ$ . Pada simulasi ini, *coefficient pressure* diambil pada titik pusat lingkaran penampang melintang yang ada pada

*bend* Dari ketiga kasus yang ada dapat dilihat bahwa nilai dari  $C_p$  semakin menurun ketika melewati penampang inlet bend, pada penampang bend sudut  $\Theta = 15^\circ$ ,  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Theta = 45^\circ$ ,  $\Theta = 60^\circ$ , dan  $\Theta = 75^\circ$ . Hal tersebut mengindikasikan bahwa ada peningkatan kecepatan dari fluida yang melewati bend pada titik tengah penampang melintang. Sedangkan pada titik 1-D *after bend* terdapat kenaikan dari nilai  $C_p$  pada ketiga kasus secara signifikan yang menandakan bahwa pada titik tersebut kecepatan fluida rendah hal ini terjadi karena pada titik tersebut terjadi *wake*.

Semakin meningkatnya fraksi volume *solid* akan membuat aliran *gas-solid* yang melewati bend  $90^\circ$  cenderung untuk terbentuknya endapan partikel *solid* pada dinding *bend* dan sesaat setelah aliran keluar *bend*. Pengendapan partikel *solid* lebih dominan disebabkan oleh turbulensi dari aliran udara pembawa dibandingkan dengan efek tumbukan partikel dengan dinding bend seperti yang terlihat pada gambar



**Gambar 2.19** Distribusi penyebaran partikel pada penampang melintang *bend* dengan dan tanpa adanya injeksi *air assisted*  $\alpha = 0.75$



**Gambar 2.20** Grafik *average DPM concentration* pada aliran *gas-solid*  $\alpha = 0.75$ .

bahwa nilai DPM rata-rata yang paling kecil pada sebagian besar luar penampang melintang dimiliki oleh *bend* dengan injeksi *air assisted* dengan sudut injeksi  $30^\circ$  hal ini mengindikasikan bahwa dengan menambahkan *air assisted* dengan sudut injeksi  $30^\circ$  efektif untuk mengurangi terjadinya pengendapan partikel pada dinding *bend* dan pada dinding pipa setelah *bend*. Sedangkan pada *bend* tanpa adanya penambahan *air assisted* mempunyai nilai dari *average DPM concentration* yang tinggi pada semua penampang melintang. Dan untuk *bend* dengan penambahan *air assisted* dengan sudut injeksi  $45^\circ$  mempunyai nilai *average DPM concentration* berada di antara dua yang lainnya.

*Halaman Kosong*



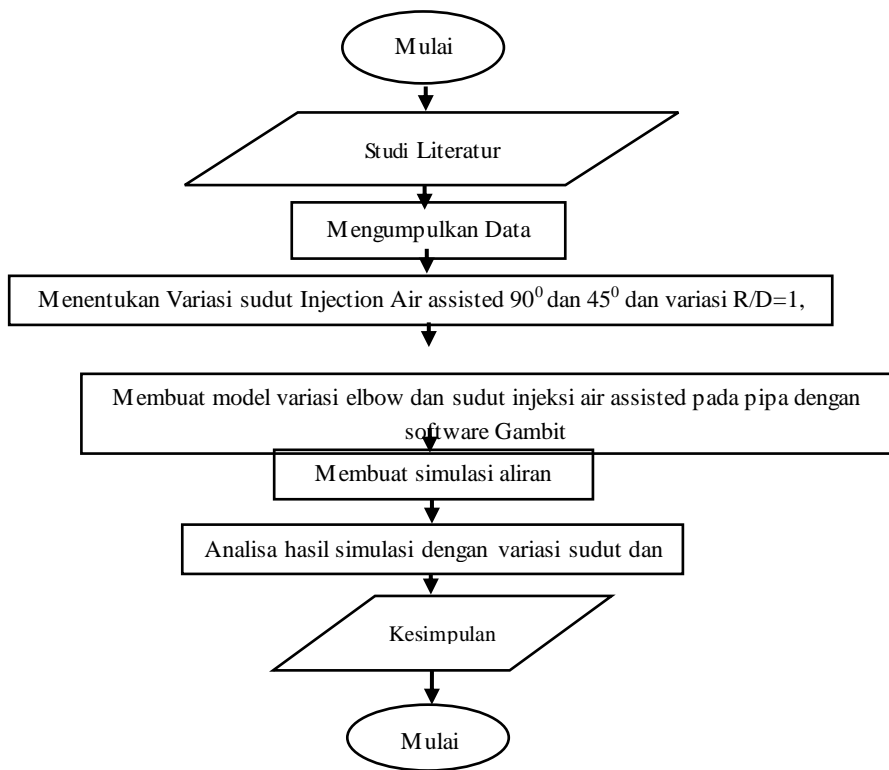
## **BAB III**

### **METODOLOGI**

Bab ini menjelaskan langkah–langkah yang digunakan dalam penyelesaian masalah pada Tugas Akhir ini. Di samping itu, dijelaskan pula geometri pada model yang akan digunakan, prosedur dan proses pelaksanaan tiap–tiap langkah yang dilakukan dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini, metodologi penyelesaian yang digunakan adalah pemodelan numerik (CFD).

Tugas Akhir ini mensimulasikan aliran yang mengalir di dalam pype bend instalasi fly ash, yang mengacu pada data tugas akhir Sariadi yaitu *Simulasi Numerik Pada Dense Phase Pneumatic Conveyor Dengan Pressurized Air Assisted Untuk Mereduksi Terjadinya Clogged Pada Sistem Perpipaan*. Pada tugas akhir ini mensimulasikan aliran pipa elbow kearah vertikal dengan variasi sudut injeksi air assisted  $45^{\circ}$  sebelum melewati elbow dan  $90^{\circ}$  tepat pada kelengkungan Elbow . Dengan variasi ukuran  $R/D = 1$ ,  $R/D = 1,5$  , dan  $R/D = 2$  ° pada aliran gas-solid yang memiliki fraksi volume 0, 5 .

#### **3.1 Diagram Alir Penelitian**



**Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian**

### **3.2 Menentukan Parameter**

#### **3.2.1 Parameter yang dijaga koonstan adalah :**

- Debit dari conveying air
- Jenis dan properties material ( massa jenis dan ukuran dari partikel solid)

- Diameter pipa , jenis, tekanan dari pressurized air
- Besarnya fraksi massa solid di dalam gas-solid flow sebesar 0.5

### 3.2.2 Parameter yang Divariasikan:

- Sudut injeksi pressurized air (  $90^\circ$  dan  $45^\circ$  )
- Radius kelengkungan bend  $R/D = 1$ ,  $R/D = 1,5$ ,  $R/D = 2$

## 3.3 Metode Numerik

Penelitian numerik dilakukan dengan menggunakan metode *Computational Fluid Dynamics (CFD)* dengan membuat model awal dan melakukan diskritisasi pada model tersebut. Prosedur yang dilakukan pada penelitian numerik adalah tahap pengukuran dimensi pipa dan elbow yang akan disimulasikan, tahap *pre-processing*, tahap *processing* dan dilanjutkan dengan tahap *post-processing*.

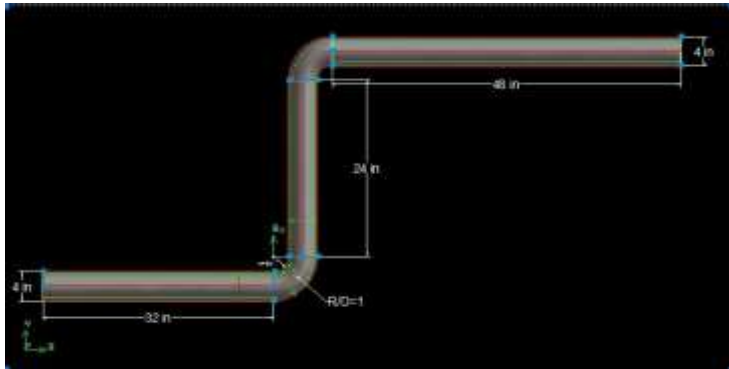
### 3.3.1 Tahap Pengukuran Dimensi Pipa dan Elbow

Berikut adalah langkah-langkah yang dilakukan untuk memperoleh dimensi, panjang pipa dan elbow :

#### a) Menentukan ukuran pipa

Internal diameter pipa dan bend	= 4 in
Panjang pipa inlet	= 32 in
Panjang pipa outlet	= 72 in
Jarak titik injeksi terhadap inlet bend	= 32 in
Internal diameter injector pipe	= 0.75 in
Panjang pipa injeksi	= 10 in
Sudut injeksi	= $90^\circ$ pada elbow dan $45^\circ$ pada inlet sebelum elbow
Radius kelengkungan bend	= ( $R/D = 1 = 4$ in ) ( $R/D = 1,5 = 6$ )

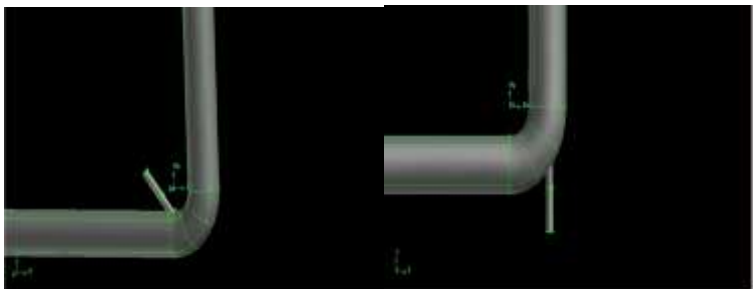
in), dan  $(R/D = 2 = 8 \text{ in})$



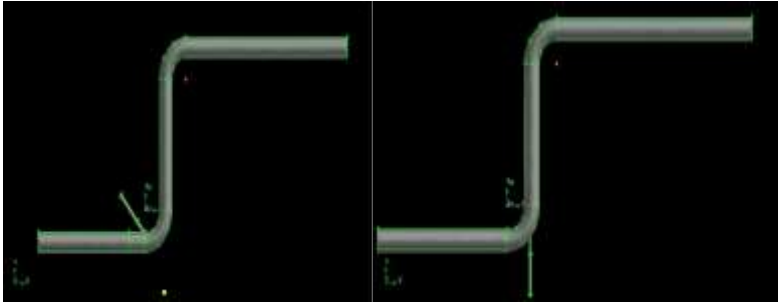
**Gambar 3.2** Desain Pemodelan dan Ukuran pada Pipa elbow vertikal

### 3.3.2 Tahap Pre-processing

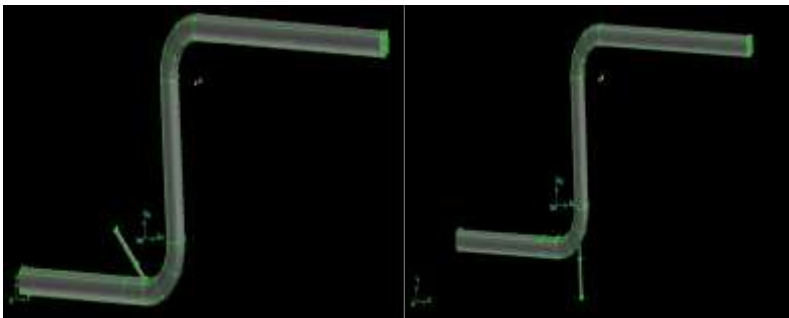
- a) Membuat geometri Pipe elbow dan Injeksi pada GAMBIT dengan geometri sesuai dengan ukuran dan variasi yang ditentukan, yaitu variasi sudut injeksi  $45^\circ$ ,  $90^\circ$  pada radius kelengkungan elbow 1, 1,5 dan 2, seperti yang terlihat pada **gambar 3.1**, **3.2**, dan **3.3**



**Gambar 3.3** Desain Pipa injeksi  $45^\circ$  dan  $90^\circ$  Dengan R/D 1 Pada Gambit



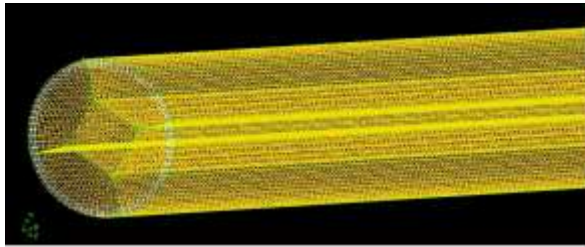
**Gambar 3.4** Desain Pipa injeksi 45° dan 90° Dengan R/D 1,5 Pada Gambit



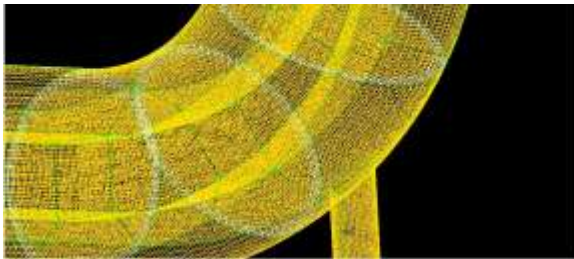
**Gambar 3.5** Desain Pipa injeksi 45° dan 90° Dengan R/D 1,5 Pada Gambit

- b) Melakukan *Split Face* yang digunakan untuk memotong/memisahkan suatu bidang dengan bidang yang lain. Pada perintah ini dapat juga digunakan untuk memotong bidang dengan garis, titik, atau suatu bidang tetapi hasilnya adalah bidang virtual. Jadi proses pemotongan bidang dengan bidang dapat menghasilkan bidang nyata atau tidak nyata, tergantung dari pilihan pada form split face.

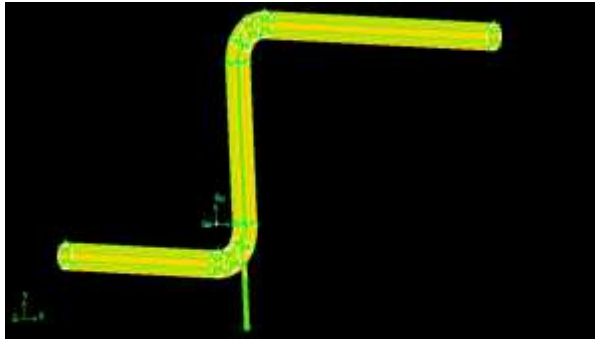
- c) Melakukan *Subtract* yang berguna untuk mengurangi/memotong obyek menggunakan obyek yang lain.
- d) Membuat *meshing* dilakukan agar kondisi batas dan parameter yang diperlukan dapat di aplikasikan dalam volume-volume kecil. Meshing dilakukan dengan cara membagi model solid menjadi volume-kecil. *Meshing* pada penelitian ini dapat ditunjukkan pada **gambar 3.2** dibawah



**Gambar 3.6** Mhesing Pada Inlet Pipe injeksi 90° dengan  $R/D=1,5$



**Gambar 3.7** Mhesing Pada Elbow Pipe injeksi 90° dengan  $R/D=1,5$

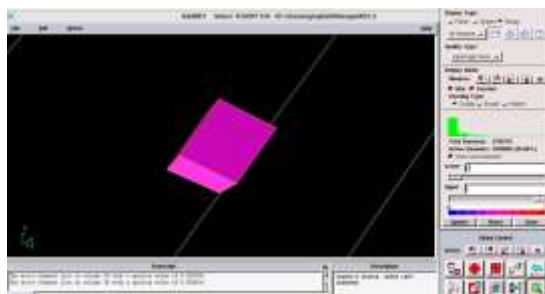


**Gambar 3.8** Meshing pada full model injeksi 90° dengan  $R/D=1,5$

e) Memeriksa Kualitas *Mesh*

Kualitas *mesh* sangat berpengaruh terhadap keakuratan dan konvergensi. Kualitas *mesh* yang rendah akan menghasilkan solusi yang kurang akurat dan waktu. Untuk menjaga kualitas mesh yang baik, ada beberapa hal yang harus dilakukan :

1. Memperkecil *EquiAngle Skew*, jangan melebihi 0,9, dan aspect ratio.
2. Meminimalkan perubahan ukuran mesh yang ekstrim. Hasil pemeriksaan kualitas mesh didapat *EquiAngle Skew* sebesar 0,500034



**Gambar 3.9** kualitas mesh didapat Equiangle Skew

f) Mendefinisikan kondisi batas

Yaitu penentuan parameter-parameter dan batasan yang mungkin terjadi pada aliran. Kondisi batas *inlet* adalah *pressure inlet* dan *outlet* adalah *pressure outlet*. Dan kondisi batas dinding pipa adalah *wall*.

### 3.3.3 Tahap Processing

*Mesh* model yang telah dibuat di GAMBIT harus dibuka dahulu di FLUENT agar dapat melakukan analisis sesuai yang diinginkan. Untuk membuka *mesh* model dapat dilakukan melalui perintah File □ Read □ Case. Setelah file telah dibuka maka selanjutnya adalah sebagai berikut :

a) *Check*

*Mesh* model yang telah dibuka pada FLUENT harus dicek terlebih dahulu apakah pada *mesh* tersebut terdapat kesalahan (error) atau tidak. Proses pengecekan *mesh* ini dapat dilakukan melalui Grid □ Check.

b) *Scale*

Langkah ini bertujuan untuk menyesuaikan skala ukuran agar sesuai dengan yang diinginkan. Yaitu dengan Grid □ Scale. Maka akan muncul panel Scale Grid. Pada Unit Conversion terdapat pilihan untuk mengatur satuan yang diinginkan.

c) *Models*

Model numeric yang digunakan dalam penyelesaian studi numerik dapat dilihat pada table 3.1 Model Numerik yang digunakan



**Tabel 3.1 Model Numerik yang digunakan**

<b>Model</b>	<b>Keterangan</b>	<b>Dasar pemilihan</b>
Multiphase	off	Interaksi antar partikel diabaikan, aliran gas-solid cukup dimodelkan dengan discrete phase model.
Energy equation	on	Dalam penelitian ash yang di transfer mempunyai suhu sekitar 90° sehingga perpindahan panas ke lingkungan tidak bisa diabaikan.
Turbulensi	k- $\epsilon$ realizable	Pemodelan dengan kasus pada penelitian cocok untuk menggunakan model turbulensi ini, karena performasi yang baik tanpa menggunakan mathematical constrain.
Radiation	off	Suhu gas-solid tidak tinggi sehingga efek dari radiasi bisa diabaikan.
Heat exchanger	off	-

d) <i>Smooth/Swap Grid</i>	Species	off	Partikel ash adalah partikel y bersifat stabil untuk telibat r kimia dengan udara pembaw
----------------------------	---------	-----	--

Proses ini dilakukan untuk memperhalus grid apabila masih kasar. Langkah yang dilakukan adalah Grid ☐ Smooth/Swap. Akan muncul panel *Smooth/Swap Grid*. Klik Smooth, kemudian klik Swap lagi bergantian sampai Number Swapped = 0. Klik Close jika sudah.

e) *Grid*

Proses ini dilakukan untuk menampilkan grid. Yaitu dengan klik Display ☐ Grid, maka akan muncul panel Grid Display. Pada kolom Surfaces, dapat dipilih zona mana saja yang ingin dilihat. Klik Display akan muncul window baru yang menampilkan grid yang telah dibuat di gambit.

f) *Solver*

Untuk menggunakan panel solver, melalui perintah Define ☐ Models ☐ Solver. Pada kasus ini, di kolom Solver dipilih Pressure Based, kolom Space dipilih 2D, kolom Velocity Formulation dipilih Absolute, kolom Gradient Option dipilih Green-Gauss Cell Based, kolom Formulation dipilih Implicit, kolom Time dipilih Steady, dan di kolom Porous Formulation dipilih Superficial Velocity.

g) *Viscous*

Pilihan model viskos yang ada di FLUENT dapat dipilih dari perintah Define ☐ Models ☐ Viscous. Pada menu model viskos terdapat beberapa pilihan yang dapat dipilih.

h) *Materials*

Langkah yang penting dalam pemodelan di FLUENT adalah mendefinisikan sifat fisik material. Sifat material

didefinisikan di panel material dengan perintah Define ☐ Material. Selanjutnya adalah mengganti jenis material sesuai dengan yang diinginkan, dengan cara klik Fluent Database. Pada kasus ini dipilih jenis material *Solid - Gas*. Kemudian klik Copy☐Close, kemudian klik Change/Create ☐ Close.

Material air(udara) pembawa

**Tabel 3.2 Tabel Properties Udara Pembawa**

<b>Property</b>	<b>Units</b>	<b>Value(s)</b>
Density	kg/m <sup>3</sup>	1.225
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	1006.43
Thermal Conductivity	W/m-K	0.0242
Viscosity	kg/m-s	0.000017894
Molecular Weight	kg/kgmol	28.966
Standard State Enthalpy	J/kgmol	0.0008
Reference Temperature	K	298.15

Properties Material Ash

**Tabel 3.3 Tabel Properties Flyash**

<b>Property</b>	<b>Units</b>	<b>Value(s)</b>
Density	kg/m <sup>3</sup>	1150
Cp (Specific Heat)	J/kg-K	540

Thermal Conductivity	w/m-k	0.045400001
----------------------	-------	-------------

i) *Injection*

Proses pengimputan *ash* kedalam aliran udara pada aliran *gas-solid* pada penelitian ini menggunakan metode injeksi. Dalam tahap ini dibutuhkan data properties dari *ash* , diameter ash, laju aliran batu bara , temperature batubara, dan material batubara.

**Tabel 3.4 Tabel Setting Injection Type**

	<b>Setting injection</b>	<b>Dasar pemilihan</b>
<b>Injection type</b>	Surface	
<b>(inlet gas-solid flow)</b>	Karena material ash mengalir pada semua penampang melintang pipa	
<b>Particle tipe</b>	inert	Karena partikel ash tidak bereaksi dengan udara pembawa
<b>Material</b>	Arsenic-hydrite ( ash)	
<b>Diameter distribution</b>	uniform	Asumsi bahwa ukuran dari partikel ash seragam
<b>Temperature</b>	363 K	
<b>Total flow rate</b>	Variasi 1 = 60.68 kg/s	

	Variasi 2 = 182 kg/s	
	Variasi 3 = 548 kg/s	
<b>diameter</b>	30 $\mu\text{m}$	
<b>Velocity magnitude</b>	3 m/s (injecting using face normal direction)	Menggunakan rasio slip 80%
<b>(kecepatan udara pembawa 3.68 m/s)</b>		

j) *Units*

Langkah ini bertujuan untuk mengganti satuan suatu besaran. Yaitu dengan melakukan perintah Define  $\square$  Units. Maka akan tampil panel Set Units, pada kolom Quantities

k) *Operating Condition*

Menentukan kondisi daerah operasi dan lingkungan di sekitar benda uji. *Operating conditions* menggunakan *operating pressure* sebesar 101325 Pascal juga terdapat pengaruh gaya gravitasi ke bawah / ke arah sumbu y negatif sebesar  $9.8 \text{ m/s}^2$ .

l) *Boundary Conditions*

Langkah ini bertujuan untuk menentukan parameter-parameter dan batasan yang terjadi pada aliran yang melewati model uji. *Boundary condition* merupakan kondisi-kondisi yang disesuaikan dengan kondisi gas-solid dan dimasukkan pada *inlet*. Mulai dari kecepatan, temperatur, tekanan, dan laju aliran. Sedangkan pada *outlet* biasanya didefinisikan sebagai kondisi dimana fluida tersebut keluar dari domain atau dalam suatu aplikasi CFD merupakan nilai yang didapat dari semua variabel yang

didefinisikan dan diekstrapolasi dari titik (nodal) atau sel sebelumnya.

*Boundary Condition* yang diatur adalah *inlet*, *outlet*, dan *wall*. Pada *inlet* digunakan *velocity inlet* dalam m/s. *Boundary Condition* pada *outlet* digunakan *outflow*. Sedangkan untuk *wall boundary condition* yang digunakan adalah *wall*.

- *Inlet*

*Inlet* disini berupa kondisi awal mula dari fluida saat memasuki *radius bend*, pada bagian inlet diatur menggunakan *inlet velocity* dengan nilai inlet 3.68 m/s, *velocity specification method* dipilih *magnitude*, normal to boundary, dengan turbulensi 10 %, dan *hydraulic diameter* 6 inchi. Nilai termal sama seperti injeksi 363 ° K.

- *Outlet*

Untuk bagian *outlet* diatur *outflow* dengan nilai *flow rate weighting* untuk *outlet* diberi besaran sama yaitu 1. *Discrete phase BC type* dipilih *escape*.

- *Wall*

Pemodelan dari *wall* dikondisikan sebagai *no slip wall* dan *stationary wall*. *No slip wall* menandakan terdapat interaksi antara fluida dengan *wall*. Sementara *stationary wall* menandakan bahwa *wall* dalam keadaan diam.

m) *Solution*

Parameter kontrol solusi dapat dilakukan dengan perintah Solve □ Controls □ Solution. Dimana *Solution* pada penelitian ini akan menggunakan *standard* untuk *pressure*, *second order upwind* untuk *momentum*, *turbulence kinetic energy* dan *turbulence dissipation rate*. Menggunakan *second order upwind* karena persamaan yang digunakan dalam *second order upwind* lebih teliti sampai orde 2, sangat

baik digunakan pada mesh tri/tet diman arah aliran tidak sejajar dengan mesh.

n) *Initialize*

Merupakan langkah perhitungan awal untuk memudahkan dalam mendapatkan hasil yang konvergen pada tahap iterasi. Pada penelitian ini *Initialize* dihitung dari *inlet*. Langkah ini dilakukan dengan cara klik Solve □ Initialize □ initialize □ Compute From □ Inlet □ init □ apply □ close.

o) *Monitor Residual*

Merupakan tahapan untuk penyelesaian masalah, berupa proses iterasi sampai mencapai harga kriteria konvergensi yang diinginkan. Yang dimaksud kriteria konvergensi adalah kesalahan/perbedaan antara tebakan awal dan hasil akhir dari iterasi yang dilakukan oleh FLUENT pada masing-masing persamaan yang digunakan. Untuk kriteria konvergensi ditetapkan sebesar  $10^{-6}$ , artinya proses iterasi dinyatakan telah konvergen setelah residualnya mencapai harga di bawah  $10^{-6}$ . Langkah ini dilakukan dengan cara klik Solve □ Monitors □ Residual □ Convergence Criteria  $10^{-6}$  □ plot □ OK.

p) *Iterate*

Merupakan langkah kelanjutan dari *monitor residual* yang merupakan langkah perhitungan. Pada tahap ini dilakukan iterasi sampai *convergence criterion* sebesar  $10^{-6}$ . Langkah ini dilakukan dengan cara klik Solve □ Iterare. Kriteria-kriteria pada tahap processing dirangkum pada tabel 3.3 berikut ini :

Kriteria yang dipilih pada tahap Processing

**Tabel 3.5 Kriteria Tahap Processing**

Solver	Pressure Based
Time	Steady
Formulation	Implicit

Space	3D
Velocity Formulation	Absolute
Gradient Option	Green-Gauss Cell Based
Porous Formulation	Super Ficial Velocity
Viscous Model	k-epsilon standard
Material	Liquid - Gas
Solution Pressure	Standard
Solution Momentum	Second Order Upwind
Solution Turbulent Kinetic Energy	Second Order Upwind
Solution Dissipation Rate	Second Order Upwind
Pressure-Velocity Coupling	SIMPLEC
Initialize	Inlet
Residual	0,000001

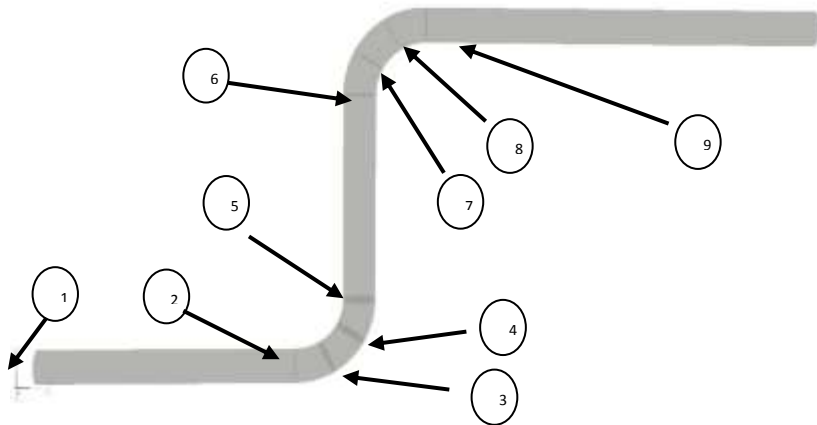
### 3.3.4 Tahap Post-processing

Tahap Processing ini menampilkan analisa terhadap hasil yang telah diperoleh berupa data kualitatif dan data kuantitatif.

- Data kualitatif berupa *kontur DPM concentration* dan *kontur velocity magnitude* pada masing-masing surface yang telah ditentukan pada model dengan memakai injeksi seperti pada *gambar 3.9* dibawah ini
- Data kualitatif berupa *kontur DPM concentration* dan *kontur velocity magnitude* pada masing-masing surface Pada model  $R/D = 2$  tanpa adanya injeksi. Yaitu pada surface seperti pada *gambar 2.10*:

- |                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| 6. Inlet Pipe       | 1. 0° Inlet Elbow 2 |
| 7. 0° Inlet Elbow 1 | 2. 30 ° elbow 2     |
| 8. 30 ° elbow 1     | 3. 60 ° elbow 2     |
| 9. 60 ° elbow 1     | 4. 90 ° elbow 2     |
| 10. 90 ° elbow 1    | 5. Outlet pipe      |





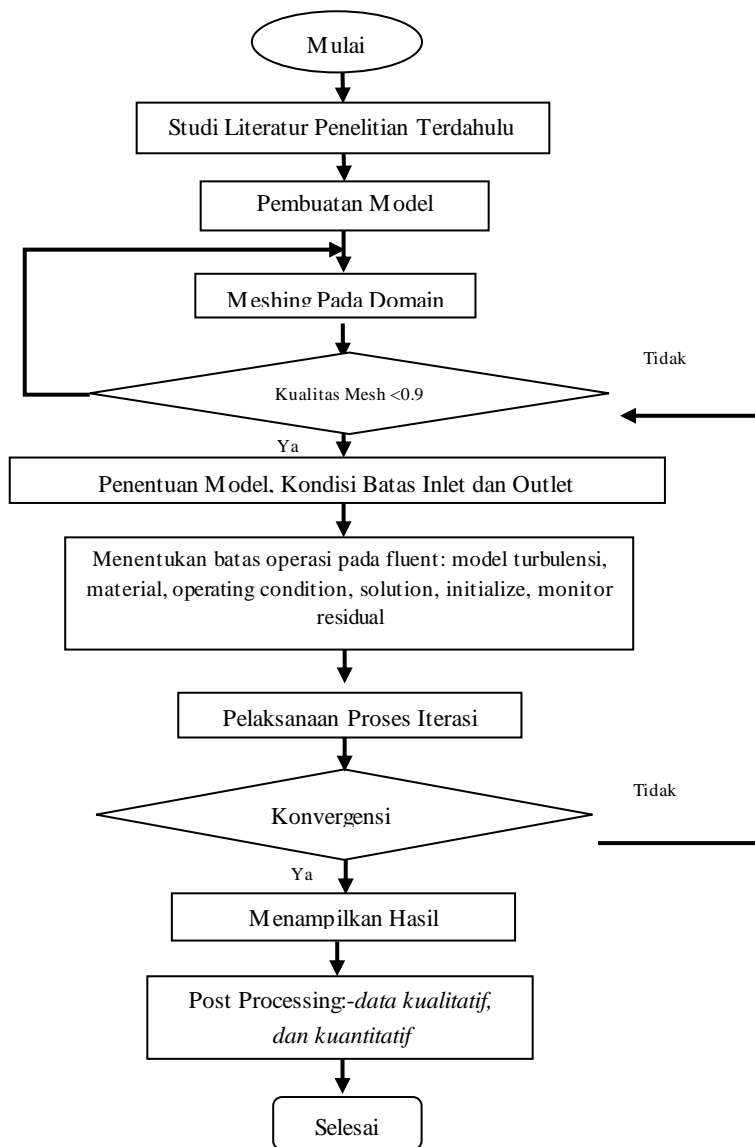
**Gambar 3.10** Surface pengambilan data.

Posisi pengambilan data diambil pada posisi area penampang melintang yang berjarak 5 in sebelum masuk *bend*, sisi masuk *bend* ( $\Theta = 0^\circ$ ),  $\Theta = 30^\circ$ ,  $\Theta = 60^\circ$ , *outlet bend* ( $\Theta = 90^\circ$ ) dan pada penampang melintang yang berjarak 5 in , setelah *outlet bend*, pada sisi *outlet*, pada dinding dan pada penampang membujur.

- Data kuantitatif berupa *average DPM concentration*, *maximum DPM concentration*, *average velocity magnitude*, *minimum velocity magnitude*, dan *maximum velocity magnitude* pada masing masing area pengambilan data.

### 3.4 Diagram Alir Hasil Simulasi Penelitian

Berikut adalah langkah-langkah proses pengerjaan yang dilakukan dalam penelitian :



**Gambar 3.12** diagram Alir Hasil Simulasi Penelitian

3.5 Grid Independensi dan validasi

Dalam studi numerik ini diperlukan keakuratan data baik pada langkah *pre-processing* maupun *post-processing* sehingga diperlukan langkah *grid* independensi untuk menentukan tingkat kerapatan dan struktur *grid* yang akan digunakan dalam langkah *processing*. Dimana dalam tahap ini akan dicari *grid* yang paling optimal yaitu bentuk dan jumlah *grid* terkecil yang memberikan hasil yang sama dengan *mesh* yang memiliki jumlah *grid* paling besar. Analisa *grid* independensi dilakukan pada simulasi 3-D dengan berbagai variasi jumlah *mesh* yang akan digunakan dan kemudiah hasilnya dibandingkan antara satu grid dengan dengan grid yang lainya. Hasil yang dibandingkan dalam langkah grid independensi ini adalah besarnya pressure drop antara sisi inlet dengan sisi outlet pada masing masing variasi mesh.

Tabel 3.1 Analisa Grid Independensi Pressure Drop Pada Sisi Inlet Dan Sisi Outlet Bend.

Jenis Mesh	Jumlah Cell	Presure Drop (pascal)		Pressure drop (pa)	(%)
		referensi	Posisi yang sama yaitu (0 bend 1)		
A	400	10.3	5.4	4.9	6.145
B	600	10.3	5.209	4.648	5.145
C	800	10.3	5.4	4.444	5.196
D	1000	10.3	5.423	4.413	5.015

Tabel 4.1 Menunjukkan Variasi Meshing Yang Dilakukan

Pada Pemodelan 3-D Fase Campuran Yang Dialirkan Melalui *Bend* 90 ° Tanpa Adanya *Ijeksi Air Assisted*. Pada *Test Grid* Independensi Dibuat 4 Ukuran Mesh Yang Berbeda Dimulai Yang Paling Kasar Yaitu Mesh A Dengan Jumlah *Cell* 200.000 Hingga Yang Paling Halus Yaitu *Mesh E* Dengan Jumlah *Mesh* 1000.000. Dimana Pada Masing-Masing Ukuran Mesh Akan Disimulasikan Menggunakan Fluida Fasa Campuran Yang Hasilnya Berupa *Pressure Drop* Antara Sisi *Inlet Bend* Dengan Sisi *Outlet Bend* Akan Dibandingkan Antara Satu Dengan Yang Lainnya. Jika Dilihat Pada Tabel 4.1 Hasil *Pressure Drop* Yang Dihasilkan Oleh Mesh Yang Rapat Semakin Sedikit Perbedaannya Dengan Mesh Yang Lebih Rapat Lagi, Hal Ini Menunjukkan Bahwa Pengaruh Kerapatan Mesh Pada Jumlah Tersebut Tidak Menghasilkan Perubahan Hasil Simulasi Jika Mesh Diperapat Lagi. Jika Dilihat Secara Seksama Pada Mesh D Dan Mesh E Dapat Dilihat Bahwa Terjadi Kenaikan Jumlah *Mesh* Dari *Mesh C* Ke *Mesh D* Sekitar 200.000 *Cell* Tapi Hasil Dari Rata-Rata *Pressure Drop* Yang Di Hasilkan Oleh Kedua *Mesh* Tersebut Hampir Sama. Dimana *Mesh* Yang C Menghasilkan *Error* 5.19% Dari Hasil Ekperimen Dan *Mesh D* Menghasilkan *Error* 5.02 %. Karena Kedua *Mesh* Yang Mempunyai Ukuran Yang Berbeda Menghasilkan Besaran *Pressure Drop* Yang Hampir Sama Maka Disimpulkan Bahwa *Mesh* Yang Kasar ( *Mesh B* ) Adalah Mesh Yang Paling Optimum Yang Sudah Tidak Terjadi Perubahan Hasil Sumulasi Jika *Mesh* Di Perapat Lagi.

*Halaman Kosong*

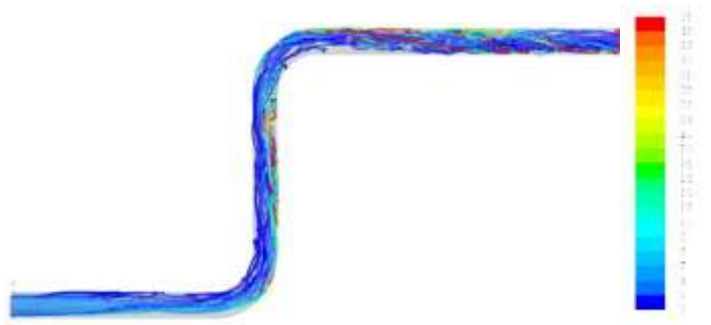
## BAB IV

### ANALISA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa dan pembahasan data hasil dari penelitian numerik tentang aliran *gas-solid* yang melewati *elbow* dengan dan tanpa adanya injeksi *pressurized air assisted*, serta pengaruh sudut injeksi *pressurized air assisted* terhadap reduksi dari material yang mengendap pada vertikal *elbow*. Pembahasan pertama mengenai *grid independensi* baru kemudian pembahasan mengenai hasil simulasi yang dihasilkan. Hasil simulasi CFD yang dibahas dalam bab ini adalah data kualitatif yang berupa *contour* dari DPM ( *discrete phase model*) *concentration* pada elbow 90° dengan fraksi volume 0.5 , serta pengaruh adanya injeksi *pressurized air assisted* dengan sudut  $\Theta = 45^\circ$  dan  $\Theta = 90^\circ$  dengan arah aliran *gas-solid*.

#### 4.1 Analisa Vektor Velocity Magnitude Udara Pembawa Pada Aliran Gas-Solid

Pada subbab ini akan dibahas mengenai kecepatan dari udara pembawa yang melalui *elbow* pada masing-masing kasus aliran *gas-solid tanpa*, dan dengan injeksi *air assisted* dengan  $\Theta = 45^\circ$ , dan dengan injeksi *air assisted* dengan  $\Theta = 90^\circ$ .

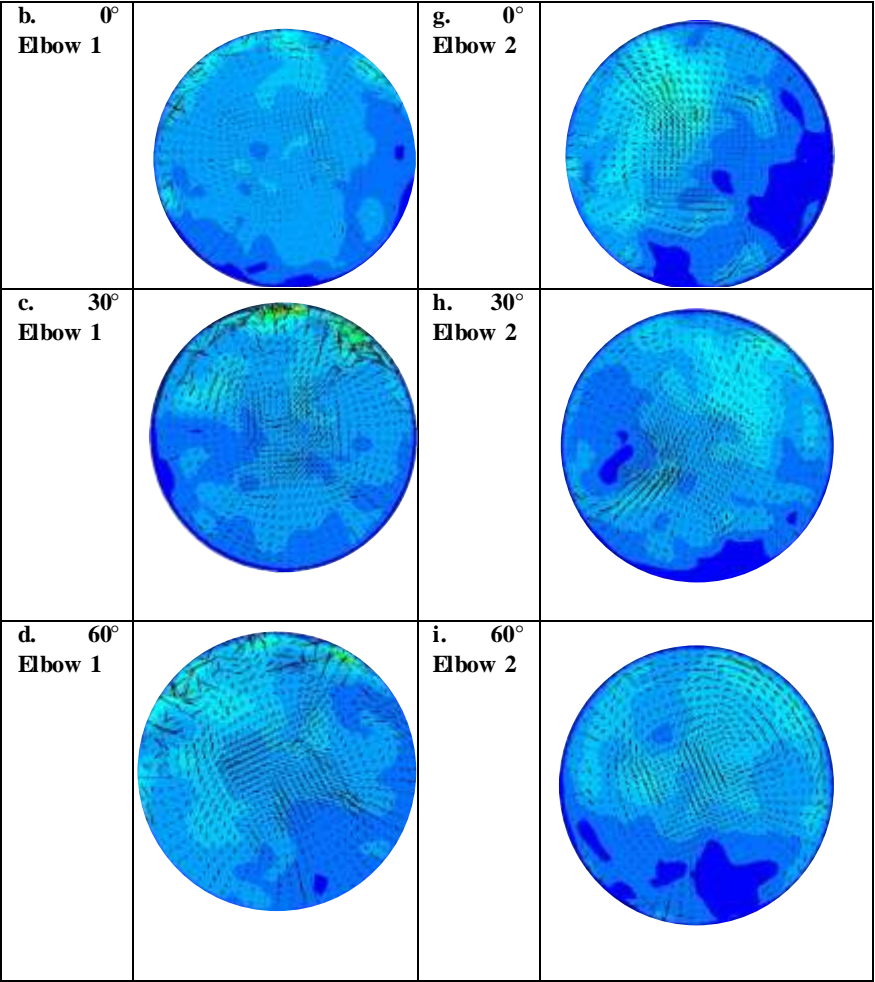


**Gambar 4.1 Velocity Pathline Tanpa Injeksi**

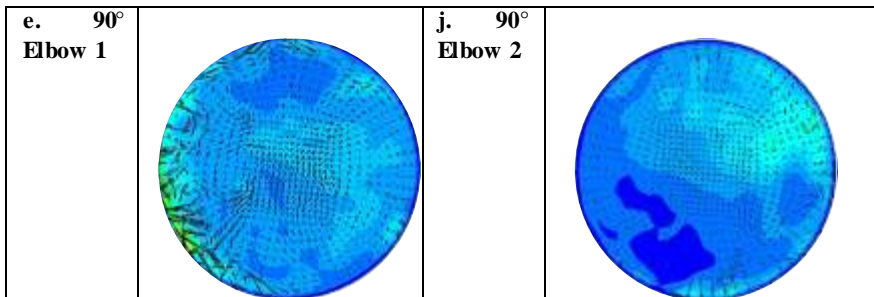
#### **4.1.1 Kontur Vektor Velocity Tiap Penampang Tanpa Injeksi Pada Pipa R/D 2**



Face	Contur Velocity Vactor	Face	Contur Velocity Vactor
a. Inlet		f. Outlet	







**Gambar 4.2 Contur Velocity Magnitude Tanpa Injeksi pada tiap tiap penampang surface elbow**

Dari gambar 4.1 diatas dapat dilihat arah dan besarnya *velocity magnitude* pada penampang melintang *elbow* tanpa adanya injeksi. Dari gambar tersebut dapat dilihat bahwa pada elbow tanpa adanya injeksi terdapat aliran searah penampang melintang.

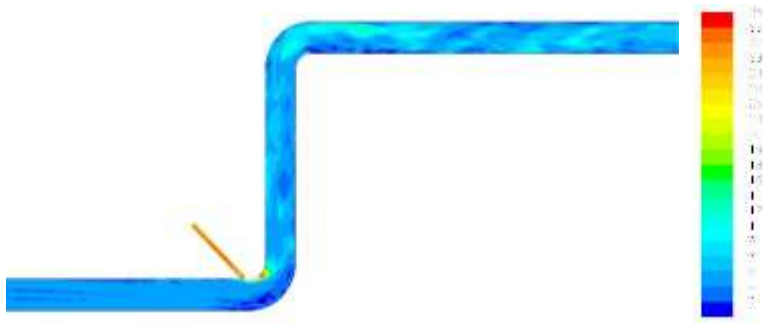
Jika dilihat pada *vector* kecepatan pada penampang melintang *elbow* tanpa adanya injeksi pada  $\Theta = 0^\circ$  terdapat aliran dari dinding *radius* luar ke dinding *radius* dalam, hal ini disebabkan karena aliran yang mula-mula bergerak lurus tiba-tiba dibelokan oleh *elbow* sehingga muncul gaya *sentripetal* yang mengarah ke pusat belokan elbow sehingga gaya ini menggerakakan fluida ke arah *radius* dalam. Setelah mencapai luas penampang *elbow*  $\Theta = 30^\circ$  terdapat aliran fluida dari dinding *radius* dalam ke dinding *radius* luar pada bagian tengah penampang *elbow*, hal ini disebabkan karena *moment inertia* dan kecepatan yang dimiliki oleh aliran tersebut kuat untuk melawan perbedaan tekanan antara sisi *radius* dalam dan *radius* luar, dimana pada *radius* luar mempunyai tekanan yang lebih tinggi. Sedangkan pada aliran fluida di dekat dinding atas dan dinding bawah mempunyai *moment inersia* dan kecepatan yang kecil sehingga tidak bisa melawan perbedaan tekanan, sehingga pada bagian tersebut fluida akan mengalir dari dinding *radius* luar ke dinding *radius* dalam. Gabungan dari kedua gerakan ini akan membentuk dua pusaran pada sisi atas dan pada sisi bawah. Fenomena ini biasanya disebut dengan *secondary flow*.

Fenomena ini akan terus terjadi sampai pada penampang elbow 90° elbow 1.

*Profil velocity magnitude* pada penampang melintang pada 90° sampai 0° elbow 2 atau setelah keluar elbow memiliki profile kecepatan yang tidak simetris antara dinding pipa pada sisi *radius* dalam elbow dengan dinding pipa pada sisi *radius* luar elbow. Kecepatan udara di dekat dinding pipa pada sisi *radius* dalam elbow terlihat lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan udara di dekat dinding pipa pada sisi *radius* luar elbow. Kecepatan yang rendah di dekat dinding pipa pada sisi *radius* luar elbow disebabkan oleh terjadinya olakan pada daerah tersebut karena adanya *adverse pressure gradient* yang terjadi pada aliran pada daerah tersebut. *Adverse pressure gradient* yang terjadi karena adanya peristiwa aliran fluida yang seolah-olah melewati sebuah *nozzle* dan *diffuser* secara berurutan. Pada saat aliran fluida melewati area dengan penyempitan luas penampang akan mengalami kenaikan kecepatan dan penurunan tekanan, sedangkan ketika aliran melewati penampang yang mengalami perluasan penampang maka aliran fluida akan mengalami penurunan kecepatan dan mengalami kenaikan tekanan. Kenaikan tekanan ini akan membuat aliran fluida akan mengalir dari daerah yang mempunyai tekanan rendah ke daerah yang mempunyai tekanan tinggi, peristiwa ini dinamakan *adverse pressure gradient*, *adverse pressure* ini akan menyebabkan *back flow* yang kemudian akan menyebabkan separasi pada daerah dekat dinding pipa pada sisi *radius* dalam.

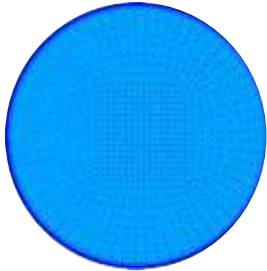
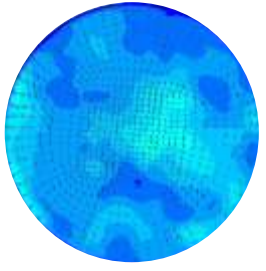
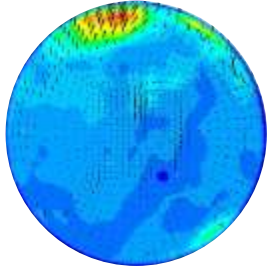
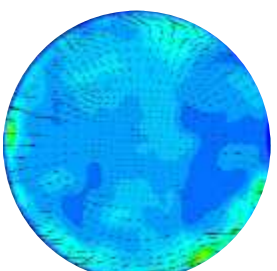
## **4.2 Analisa Vektor Velocity Magnitude R/D 1**

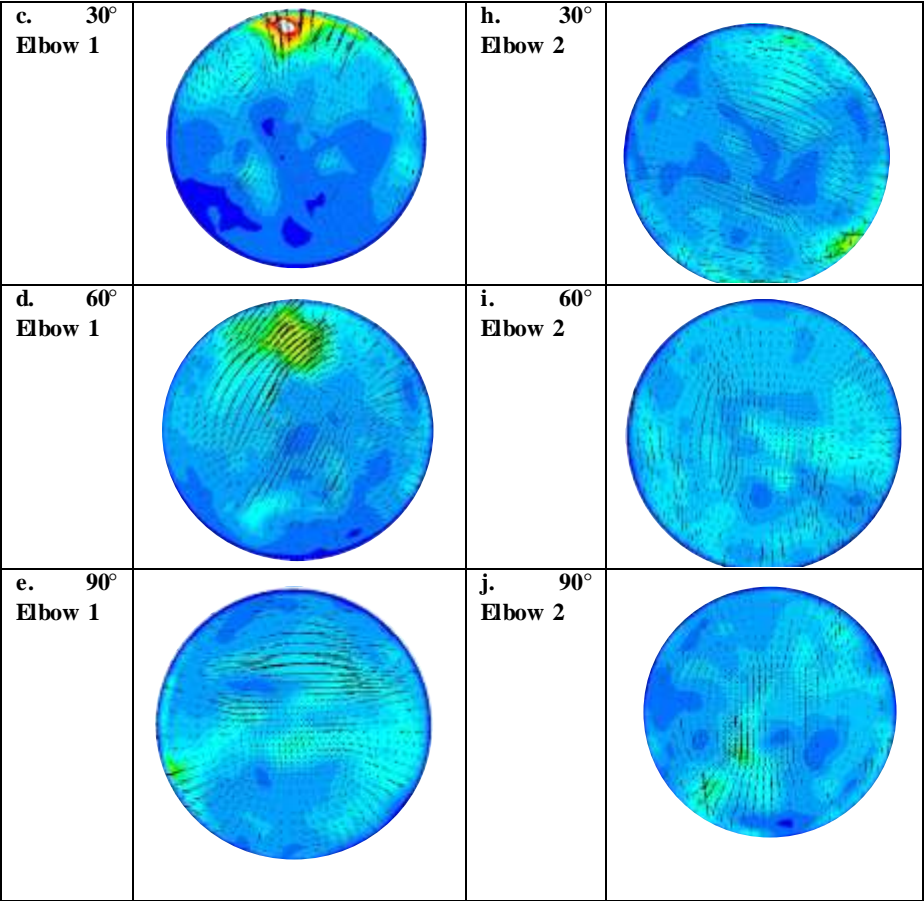
### **4.2.1 Injeksi 45 R/D 1**



**Gambar 4.3 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 1**

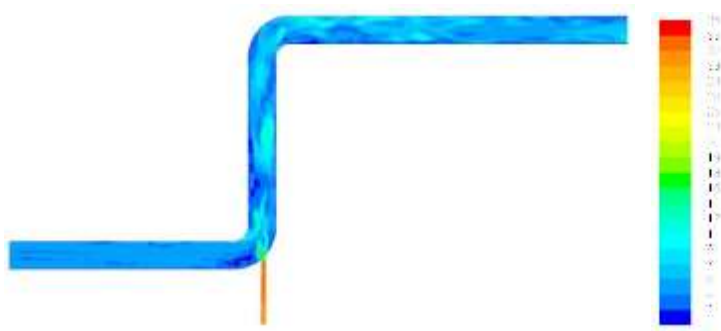


Face	Contur Velocity Vector	Face	Contur Velocity Vector
a. Inlet		f. Outlet	
b. 0° Elbow 1		g. 0° Elbow 2	



**Gambar 4.4 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 1  
pada tiap tiap penampang surface elbow**

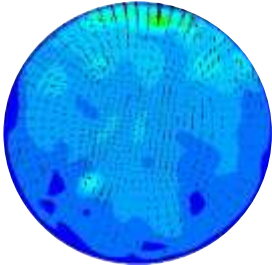
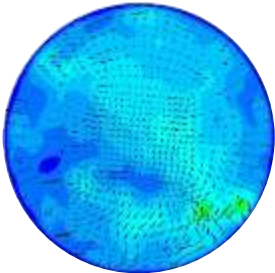
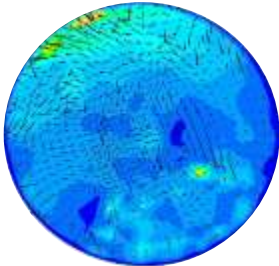
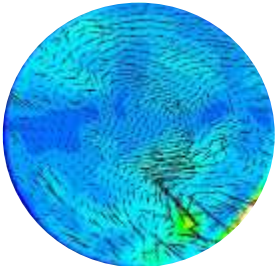
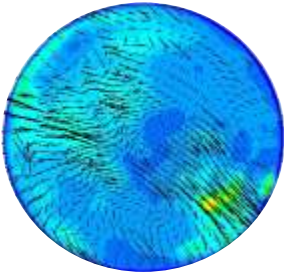
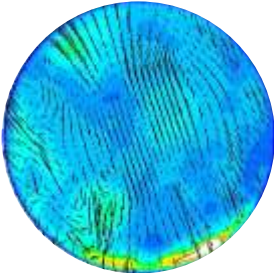
**4.2.2 Injeksi 90 R/D 1**

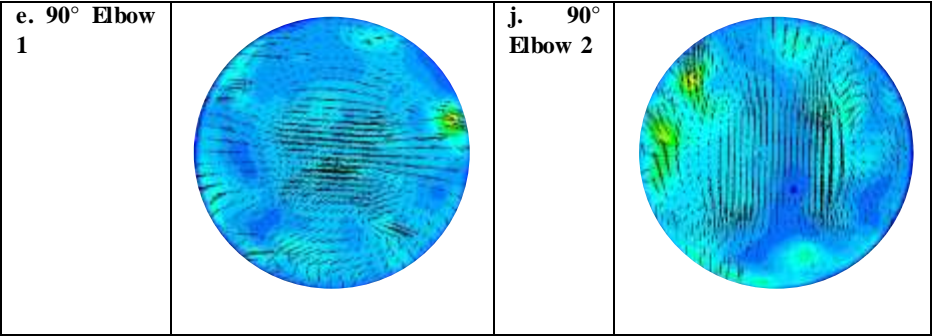


**Gambar 4.5 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 1**

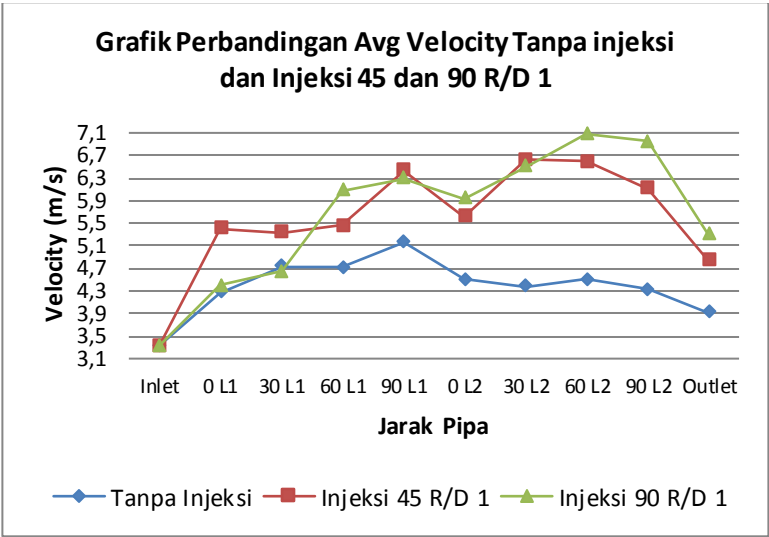


Face	Contur Velocity Vector	Face	Contur Velocity Vector
a. Inlet		f. Outlet	

b. 0° Elbow 1		g. 0° Elbow 2	
c. 30° Elbow 1		h. 30° Elbow 2	
d. 60° Elbow 1		i. 60° Elbow 2	



**Gambar 4.6** Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 1 pada tiap tiap penampang surface elbow



**Gambar 4. 7** Grafik Perbandingan Avg Velocity Tanpa injeksi dan Injeksi 45 dan 90 R/D 1

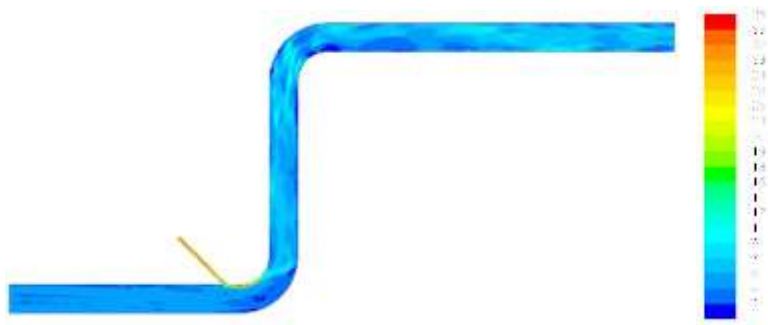
Pada grafik pada gambar 4.7 menjelaskan mengenai *average velocity* pada fase udara sebelum melewati *elbow*, saat melewati *elbow*, dan sesaat setelah keluar dari *elbow*. Pada *elbow* tanpa

adanya injeksi *air assisted* dapat dilihat ketika aliran udara melewati *elbow* terjadi kenaikan *velocity magnitude* sampai pada penampang *elbow*  $\Theta = 90^\circ$ , hal ini dikarenakan karena ketika melewati *elbow* terjadi penurunan luasan penampang yang dilewati oleh *gas-solid* seolah-olah aliran fluida seperti melewati *nozzle*, dimana saat aliran fluida melewati suatu penampang yang luas penampangnya mengalami penyempitan akan terjadi kenaikan kecepatan dari aliran fluida. Ketika keluar dari *elbow* sampai *outlet* mengalami penurunan kecepatan udara, hal ini karena setelah penyempitan luasan penampang sampai sisi luar *elbow* akan mengalami terjadi normalisasi aliran untuk mengalir pada luasan penampang secara penuh. Hal ini akan membuat udara mengalir pada penampang yang mengalami perluasan sehingga kecepatan fluida akan meningkat ketika fluida keluar melalui *elbow*. Pada *elbow* dengan tambahan *air assisted* terjadi naik kecepatan fluida yang sangat signifikan dari luasan penampang pada 1-D *before outlet* sampai penampang sisi *inlet elbow*, hal ini terjadi karena diantara kedua luasan penampang tersebut merupakan tempat di injeksikanya *air assisted*, sehingga hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan *velocity* secara signifikan. Jika diperhatikan antara ketiga grafik yang dihasilkan oleh *elbow* tanpa adanya injeksi, *elbow* dengan injeksi  $\Theta=30^\circ$ , dan *elbow* dengan injeksi  $\Theta=45^\circ$ , dapat diketahui bahwa *average magnitude velocity* untuk kasus dengan injeksi *air assisted* membentuk sudut  $30^\circ$  memberikan hasil yang paling tinggi pada ketiga kasus pada masing-masing luas penampang melintang kecuali pada bagian 1-D *before elbow*. Kecepatan maksimal yang dihasilkan oleh *elbow* dengan injeksi *air assisted* membentuk sudut  $\Theta=30^\circ$  mengindikasikan bahwa pada kasus tersebut efektif untuk meningkatkan kecepatan dari udara pembawa, sehingga terjadinya pengendapan partikel *solid* dapat diminimalkan.

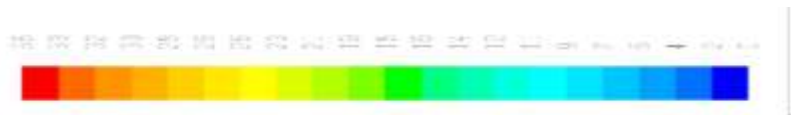
### **4.3 Analisa Vektor Velocity Magnitude R/D 1.5**


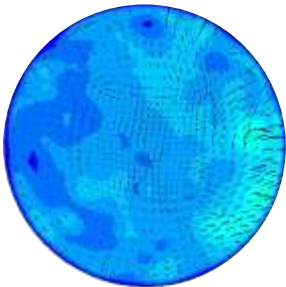
#### **4.3.1 Injeksi 45 R/D 1,5**

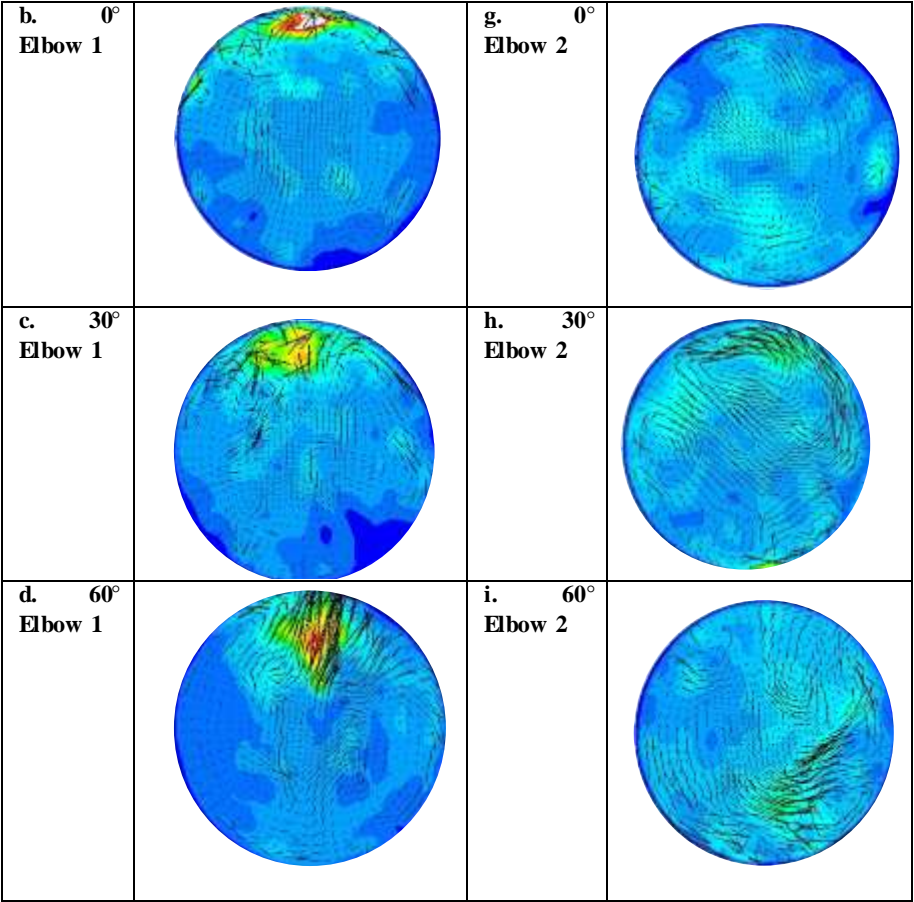


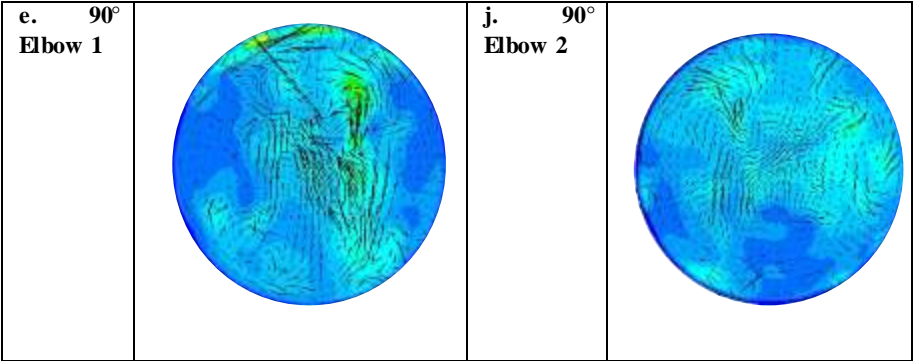


**Gambar 4.8 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 1,5**



Face	Contur Velocity Vactor	Face	Contur Velocity Vactor
a. Inlet		f. Outlet	





**Gambar 4.9** Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 1,5 pada tiap tiap penampang surface elbow

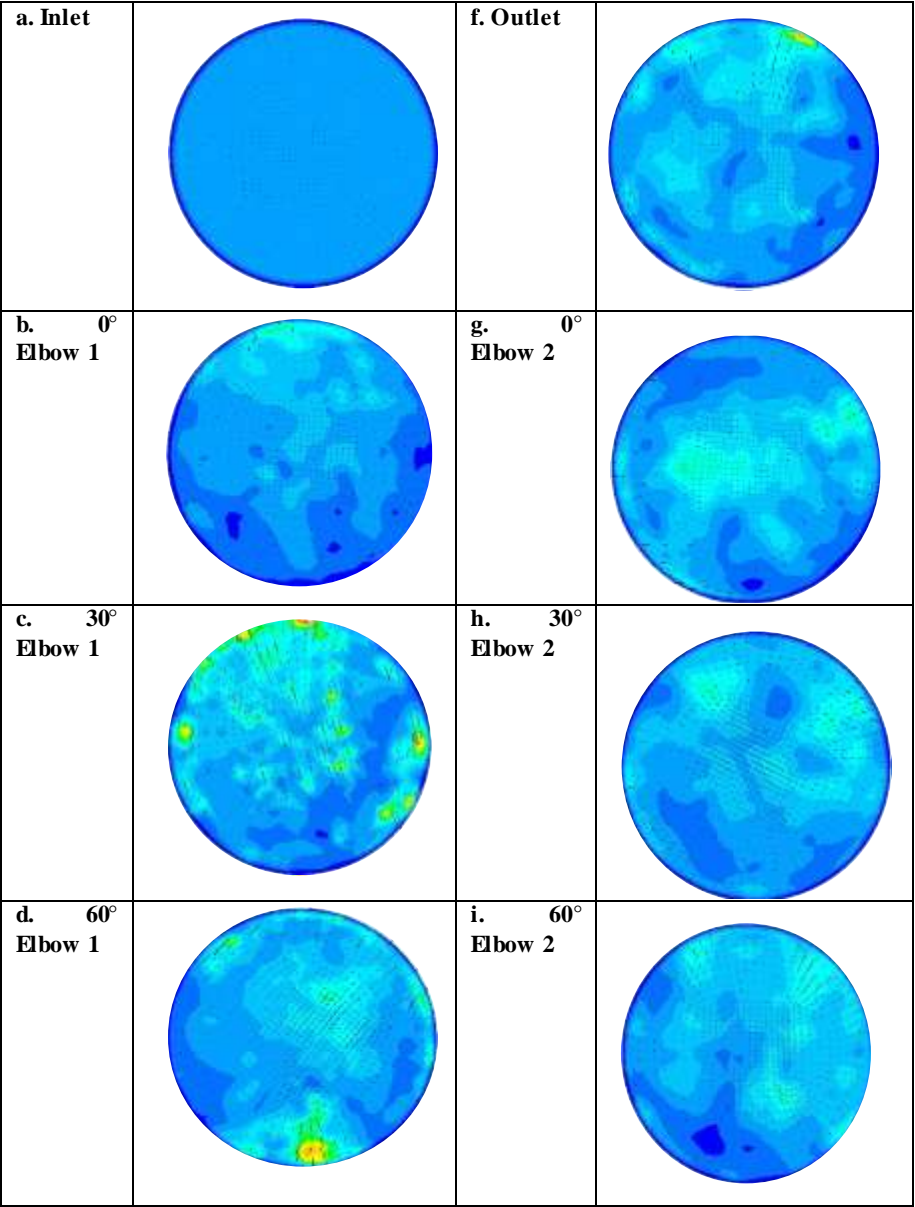
**4.3.2 Injeksi 90 RD 1,5**

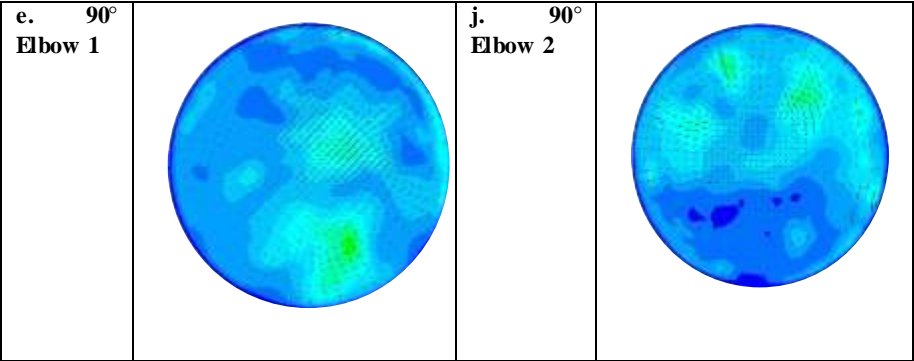


**Gambar 4.10** Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 1,5

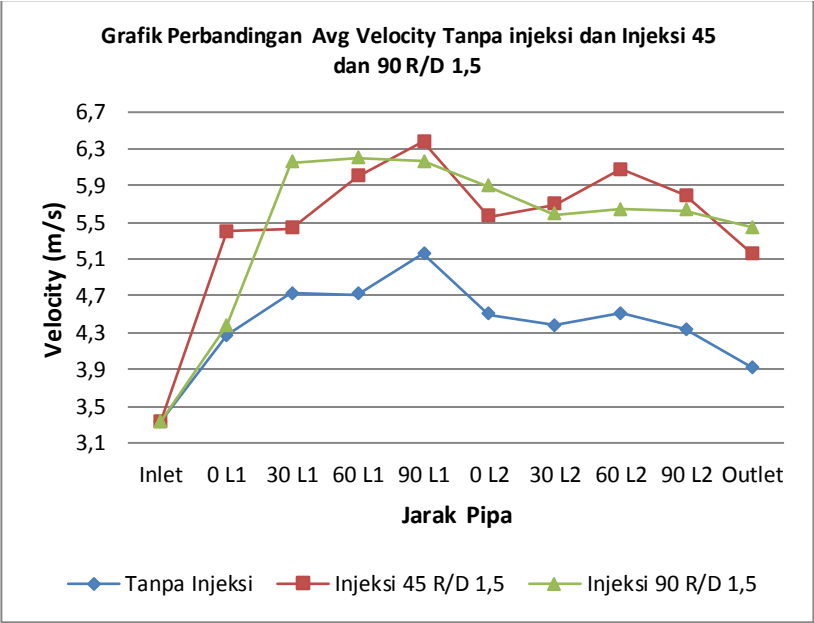


Face	Contur Velocity Vactor	Face	Contur Velocity Vactor
------	------------------------	------	------------------------





**Gambar 4.11** Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 1,5 pada tiap tiap penampang surface elbow



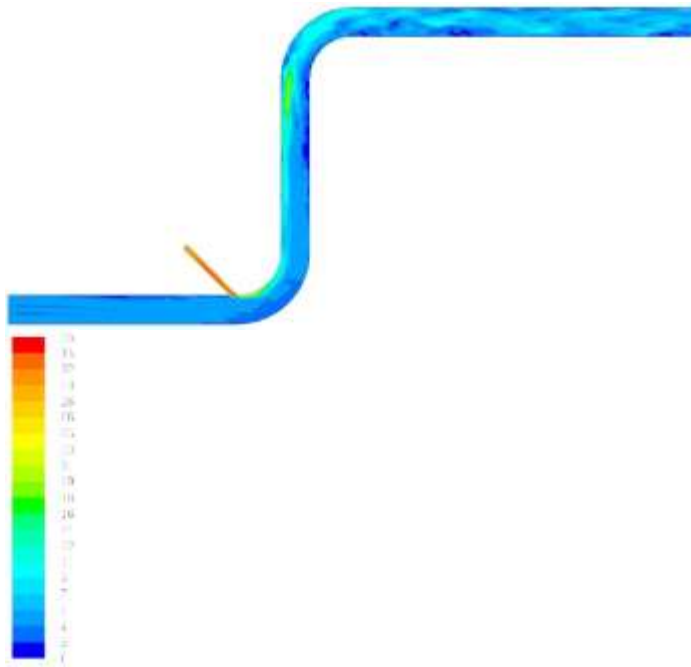
#### **Gambar 4. 12 Grafik Perbandingan Avg Velocity Tanpa injeksi dan Injeksi 45 dan 90 R/D 1,5**

Pada grafik pada gambar 4.12 menjelaskan mengenai *average velocity* pada fase udara sebelum melewati *elbow*, saat melewati *elbow*, dan sesaat setelah keluar dari *elbow*. Pada *elbow* tanpa adanya injeksi *air assisted* dapat dilihat ketika aliran udara melewati *elbow* terjadi kenaikan *velocity magnitude* sampai pada penampang *elbow*  $\Theta = 90^\circ$ , hal ini dikarenakan karena ketika melewati *elbow* terjadi penurunan luasan penampang yang dilewati oleh *gas-solid* seolah-olah aliran fluida seperti melewati *nozzle*, dimana saat aliran fluida melewati suatu penampang yang luas penampangnya mengalami penyempitan akan terjadi kenaikan kecepatan dari aliran fluida. Ketika keluar dari *elbow* sampai *outlet* mengalami penurunan kecepatan udara, hal ini karena setelah penyempitan luasan penampang sampai sisi luar *elbow* akan mengalami terjadi normalisasi aliran untuk mengalir pada luasan penampang secara penuh. Hal ini akan membuat udara mengalir pada penampang yang mengalami perluasan sehingga kecepatan fluida akan meningkat ketika fluida keluar melalui *elbow*. Pada *elbow* dengan tambahan *air assisted* terjadi kenaikan kecepatan fluida yang sangat signifikan dari luasan penampang pada 1-D *before outlet* sampai penampang sisi *inlet elbow*, hal ini terjadi karena diantara kedua luasan penampang tersebut merupakan tempat di injeksikannya *air assisted*, sehingga hal ini menyebabkan terjadinya peningkatan *velocity* secara signifikan. Jika diperhatikan antara ketiga grafik yang dihasilkan oleh *elbow* tanpa adanya injeksi, *elbow* dengan injeksi  $\Theta=30^\circ$ , dan *elbow* dengan injeksi  $\Theta=45^\circ$ , dapat diketahui bahwa *average magnitude velocity* untuk kasus dengan injeksi *air assisted* membentuk sudut  $30^\circ$  memberikan hasil yang paling tinggi pada ketiga kasus pada masing-masing luas penampang melintang kecuali pada bagian 1-D *before elbow*. Kecepatan maksimal yang dihasilkan oleh *elbow* dengan injeksi *air assisted* membentuk sudut  $\Theta=30^\circ$  mengindikasikan bahwa pada kasus tersebut efektif

untuk meningkatkan kecepatan dari udara pembawa, sehingga terjadinya pengendapan partikel *solid* dapat diminimalkan.

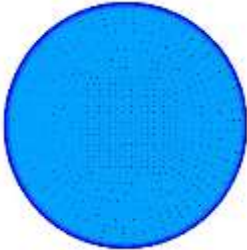
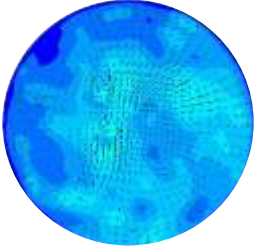
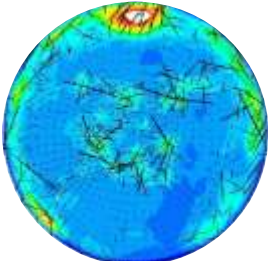
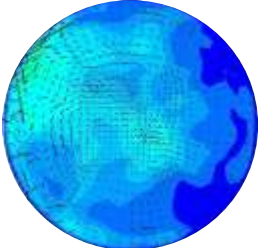
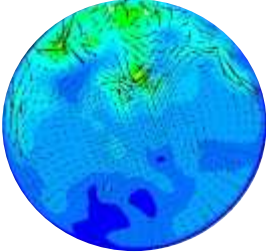
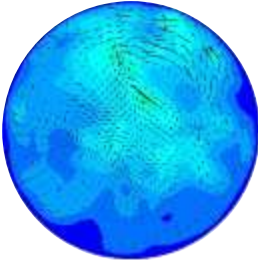
#### 4.4 Analisa Vektor Velocity Magnitude R/D 2

##### 4.4.1 RD 2 Injeksi 45

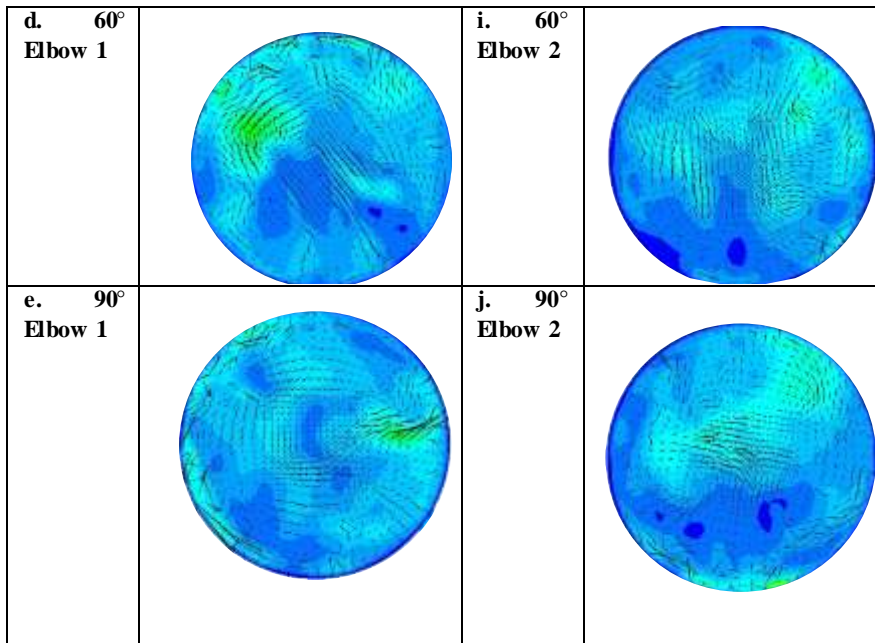


**Gambar 4.13** Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 2



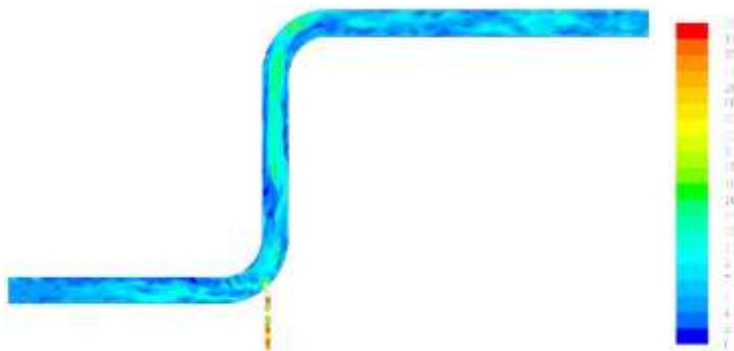
Face	Contur Velocity Vector	Face	Contur Velocity Vector
a. Inlet		f. Outlet	
b. 0° Elbow 1		g. 0° Elbow 2	
c. 30° Elbow 1		h. 30° Elbow 2	



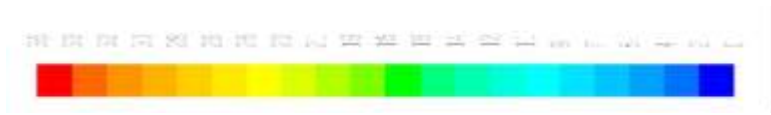


**Gambar 4.14 Contur Velocity Magnitude Injeksi 45 R/D 2  
pada tiap tiap penampang surface elbow**

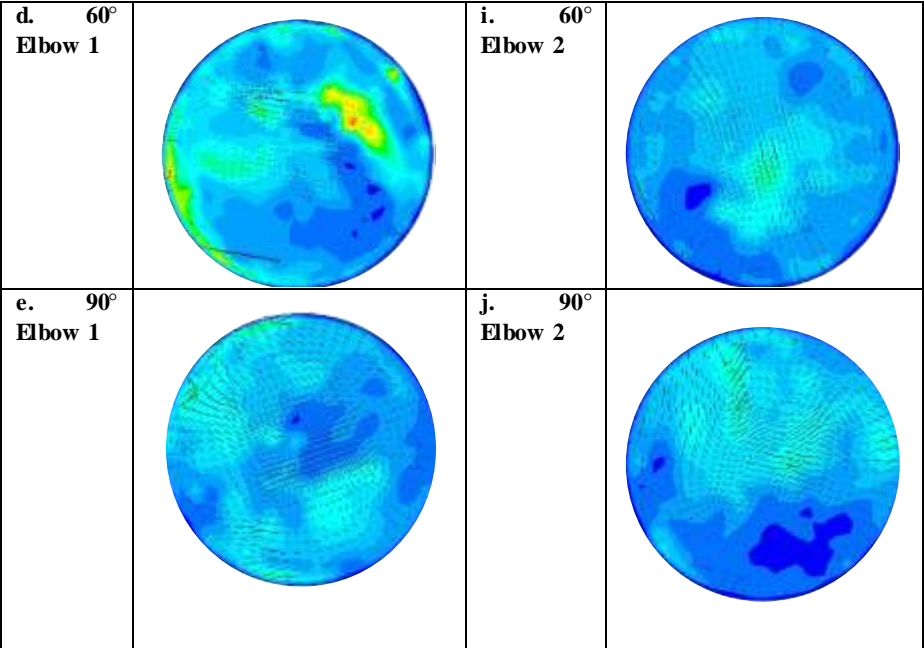
#### **4.4.2 R/D 2 Injeksi 90**



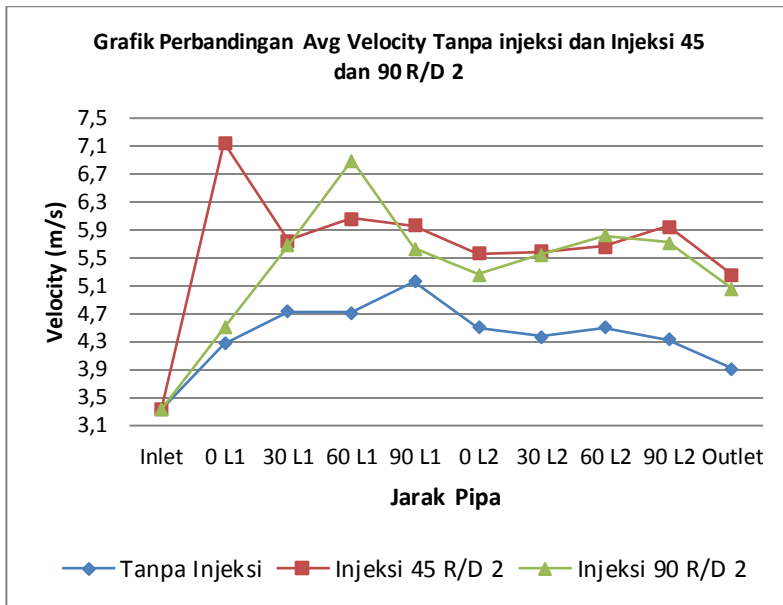
**Gambar 4.15 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 2**



Face	Contur Velocity Vactor	Face	Contur Velocity Vactor
a. Inlet		f. Outlet	
b. 0° Elbow 1		g. 0° Elbow 2	
c. 30° Elbow 1		h. 30° Elbow 2	



**Gambar 4.16 Contur Velocity Magnitude Injeksi 90 R/D 2  
pada tiap tiap penampang surface elbow**



**Gambar 4. 17 Grafik Perbandingan Avg Velocity Tanpa injeksi dan Injeksi 45 dan 90 R/D 2**

Pada Gambar 4.15 Diatas Dapat Diamati Bawah Penambahan *Air Assisted* Dapat Menambah Kecepatan Dari Aliran *Gas* Pada Daerah Dekat Dinding *Radius* Dalam *Elbow*. Sedangkan Pada Bagian Penampang Membujur Sebelum Adanya Injeksi *Air Assisted* ( 1-D Before Inlet Elbow) Profile Kecepatan Sama Untuk Semua Kasus Baik Sebelum Adanya Injeksi *Air Assisted* Dan Pada Saat Sudah Ditambah *Air Assisted*. Endapan pada permukaan luar elbow pada sudut 90° elbow 2, sehingga saat memasuki 60° elbow 2 pada radius luar terjadi peningkatan kecepatan, sedangkan pada dinding radius dalam mulai terbentuk separasi aliran akibat perbandingan radius elbow yang mulai membentuk sudut sehingga arah vektor aliran pada dinding radius dalam tidak searah.

Pada Gambar dan **4.16** pada elbow dengan sudut injeksi  $90^\circ$  dengan rasio R/D 2, terlihat bahwa aliran yang memasuki  $0^\circ$  elbow 1 profile aliran mulai meningkat nilai velocity magnitudenya. Kemudian di  $30^\circ$  elbow 1 sampai pada posisi  $90^\circ$  elbow 1 terjadi kenaikan velocity magnitude yang signifikan, dan mulai merata pada permukaan elbow di sudut injeksi  $90^\circ$ , kemudian sesaat setelah melewati elbow 1, yaitu pada  $90^\circ$  elbow 1 profile vektor aliran searah dengan arah aliran. Pada desain  $90^\circ$  air assisted ini separasi pada dinding radius dalam elbow pada  $90^\circ$  elbow 1 tereduksi, akibat dorongan arah injected air searah dengan profile kelengkungan elbow. Kemudian pada aliran  $0^\circ$  elbow 2 kecepatan sesuai arah aliran sedang pada dinding dalam radius elbow terjadi peningkatan aliran, sehingga saat memasuki  $60^\circ$  elbow 2 pada radius luar terjadi peningkatan kecepatan., dan pada radius dalam terlihat profile kecepatan aliran mulai menurun, akibat meningkatnya velocity magnitude oleh penambahan air injected. Kemudian pada dinding radius dalam mulai terbentuk separasi aliran akibat perbandingan radius elbow yang mulai membentuk sudut, sehingga arah vektor aliran pada dinding radius dalam tidak searah.

Dari gambar **4.17** terlihat grafik tersebut dapat dilihat bahwa dengan penambahan *air assisted* dapat meningkatkan *velocity magnitude* pada masing-masing penampang melintang pada elbow, hal ini disebabkan karena dengan penambahan *air assisted* dapat menambah momentum aliran *gas-solid* saat melewati elbow sehingga kehilangan momentum saat melewati elbow dapat dikompensasi. *Profile velocity magnitude* pada penampang setelah keluar elbow memiliki profile kecepatan yang tidak simetris antara dinding pipa pada sisi radius dalam elbow dengan dinding pipa pada sisi radius luar elbow. Kecepatan udara di dekat dinding pipa pada sisi radius dalam elbow terlihat lebih kecil dibandingkan dengan kecepatan udara di dekat dinding pipa pada sisi radius luar elbow. Kecepatan yang rendah di dekat dinding pipa pada sisi radius luar elbow disebabkan oleh terjadinya olakan pada daerah tersebut karena adanya *adverse pressure gradient* yang terjadi

pada aliran pada daerah tersebut. *Adverse pressure gradient* yang terjadi karena adanya peristiwa aliran fluida yang seolah-olah melewati sebuah *nozzle* dan *diffuser* secara berurutan. Pada saat aliran fluida melewati area dengan penyempitan luas penampang akan mengalami kenaikan kecepatan dan penurunan tekanan, sedangkan ketika aliran melewati penampang yang mengalami perluasan penampang maka aliran fluida akan mengalami penurunan kecepatan dan mengalami kenaikan tekanan. Kenaikan tekanan ini akan membuat aliran fluida akan mengalir dari daerah yang mempunyai tekanan rendah ke daerah yang mempunyai tekanan tinggi, peristiwa ini dinamakan *adverse pressure gradient*, *adverse pressure* ini akan menyebabkan *back flow* yang kemudian akan menyebabkan separasi pada daerah dekat dinding pipa pada sisi *radius* dalam yang dilihat dari kontur velocity magnitude yang semakin kecil

#### **4.5 Analisa DPM Concentration Terhadap Penyebaran Partikel Pada Aliran Gas-Solid**

Pada subbab ini akan diambil *kontur* dan Pathline DPM concentration pada penampang membujur *elbow* disamping itu juga akan diambil data *kualitatif* berupa *average DPM concentration*, pada setiap penampang melintang yang dilalui *gas-solid* antara lain pada posisi

Pada kasus *pneumatic conveying* partikel diangkut menggunakan udara bertekanan dengan kecepatan tertentu, pada kasus ini menggunakan tipe pengangkutan *dense phase* dimana fraksi dari volume partikel yang diangkut lebih dari 0,1. Dengan pemodelan fraksi volum 50% (182 Kg/s) Pada aliran *gas-solid* di dalam pipa banyak terdapat gaya-gaya yang akan di terapkan pada partikel yang di bawah oleh aliran, antara lain gaya *drag*, gaya gravitasi, gaya *buoyancy*, dan gaya-gaya yang disebabkan oleh interaksi antar partikel. Gaya-gaya ini akan mempengaruhi dari pada momentum dari partikel yang berpengaruh terhadap kecepatan dari gerak partikel dan udara. Jika kecepatan partikel

turun mendekati nilai nol maka partikel akan jatuh dan mengendap, pengendapan ini akan mengurangi luasan aliran *gas-solid* dan memicu terjadinya penyumbatan. Banyak faktor yang menyebabkan berkurangnya momentum dari aliran antara lain yaitu tumbukan partikel dengan dinding *elbow* atau juga partikel memasuki *zona wake* dimana aliran berputar-putar pada zona tersebut sampai partikel kehilangan momentumnya

Pada pembahasan bagian ini akan di amati pola penyebaran partikel pada aliran *gas-solid* dengan *volume fraction* dari partikel 0.5 pada aliran *dense phase* dengan kecepatan udara 3,68 m/s dengan *slip velocity* 10 %, melalui *elbow* dengan diameter internal 100 mm dan dengan *ratio* kelengkungan 1, 1,5 , dan 2 dimana partikel yang dialirkan adalah *fly ash* dengan diameter 30 mikron dengan massa jenis 1150 kg/m<sup>3</sup> . Adapun untuk penginjeksian *air assisted* menggunakan udara bertekanan dengan kecepatan 4 m/s dan di injeksikan pada jarak 0 mm sebelum aliran *gas-solid* memasuki *elbow* dengan sudut injeksi terhadap arah aliran 45° dan 90° pada radius 45° pada kelengkungan elbow .Dari hasil penelitian dengan menggunakan program CFD didapatkan pola penyebaran dari partikel *solid* yang melewati *elbow* 90° seperti berikut ini:



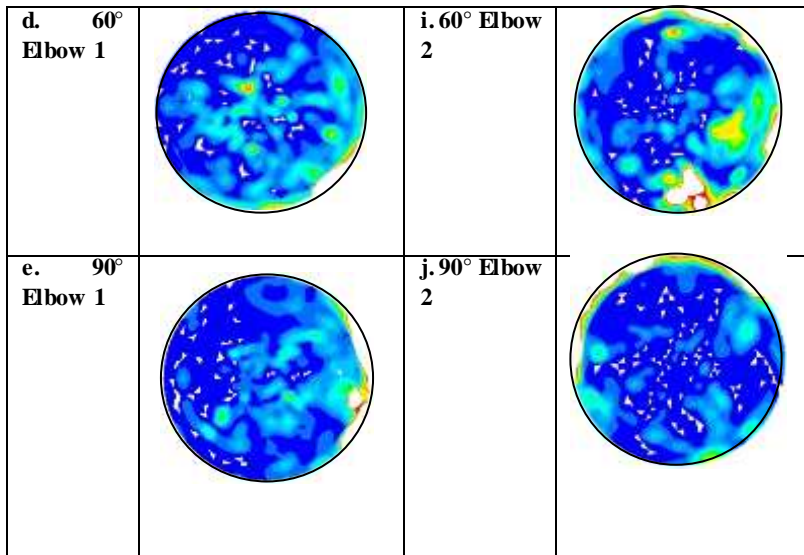
**Gambar 4.18 Contur Velocity Pathline Tanpa Injeksi**

**4.5.1 Tanpa Injeksi**



Face	Contur Concentration DPM	Face	Contur Concentration DPM
a. Inlet		f. Outlet	
b. 0° Elbow 1		g. 0° Elbow 2	
c. 30° Elbow 1		h. 30° Elbow 2	





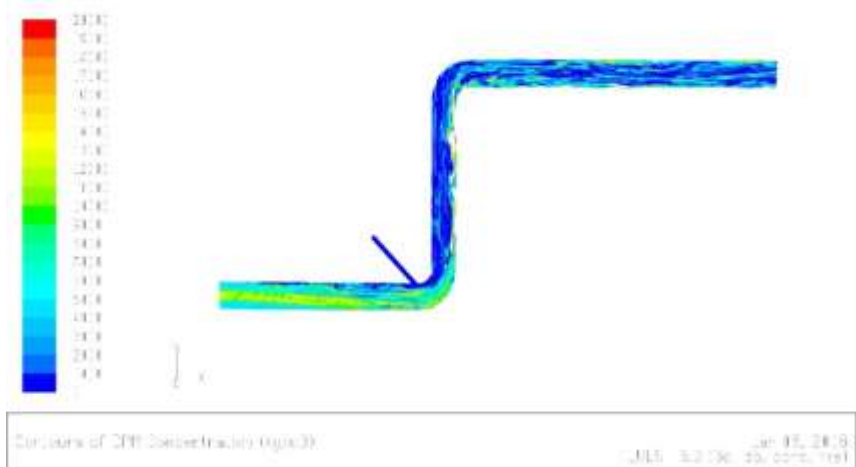
**Gambar 4.19 Distribusi Penyebaran Partikel *Solid* Pada Dinding *Elbow* dan Pipa tanpa injeksi di tiap-tiap penampang *surface elbow***

Dari Hasil Dimulasi Didapatkan Bahwa Patikel *Solid* Akan Mengendap dan Menempel pada Dinding *Elbow* Bagian dalam dan pada Pipa Dekat dengan Dinding *Elbow* Bagian dalam. Dari Semua Konsentrasi Dapat Dilihat Bahwa Pengendapan Partikel Paling Banyak Berada pada Dinding *Elbow* pada *Radius* Bagian Dalam. Hal Ini Terjadi Karena pada Daerah Dekat dengan Diding *Elbow* pada *Radius* dalam Terdapat Olakan Aliran dari Udara. Olakan Udara Ini Akan Membuat Pertikel yang Terbawa oleh Aliran Udara Akan Kehilangan *Momentum* yang Sangat Besar, Partikel yang Kehilangan *Momentum* Ini Sudah Tidak Dapat Melawan Gaya Gravitasi Sehingga Partikel Akan Mengendap. Telihat Dengan Jelas Bahwa Terjadi Pengendapan Partikel *Solid*, Hal Ini Terjadi Karena Dangan Naiknya Konsentrasi dari Parikel *Solid* Maka Akan Banyak Tumbukan Yang Terjadi Antar Partikel, Meningkatnya Intensitas Tumbukan

Akan Mengakibatkan Semakin Banyak Partikel yang Kehilangan Momentum Sehingga Semakin Banyak Pula Partikel Yang Mengendap. Besarnya Pengendapan yang Terjadi Akan Semakin Berkurang pada Aliran *Gas-Solid* dengan Nilai Fraksi Volume *Solid* yang Mengecil.

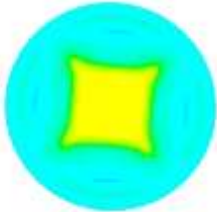
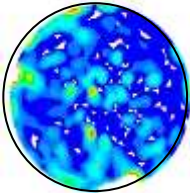
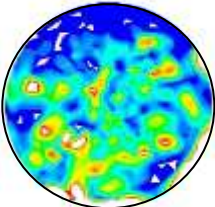
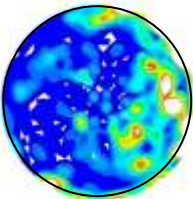
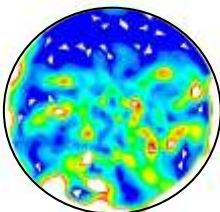
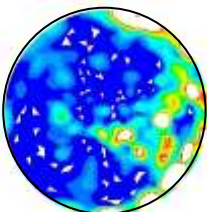
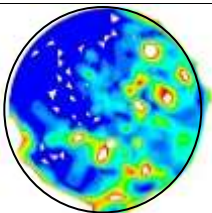
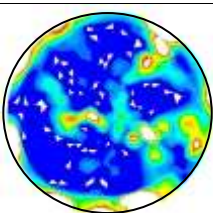
Selain diamanti pada bagian dinding penyebaran partikel pada aliran *gas-solid* ini juga diamati pada penampang melintang dari *elbow*. Penampang yang diamati pada penelitian ini difokuskan pada penampang melintang *inlet elbow*, penampang melintang pada kelengkungan elbow  $0^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $60^\circ$ , dan  $90^\circ$  (*outlet elbow*). Hal ini dilakukan untuk melihat berapa ketebalan dari pengendapan partikel yang terjadi pada dinding *elbow*

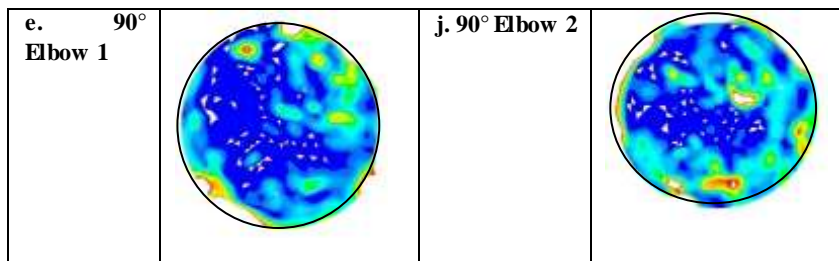
#### 4.5.2 Analisa DPM Concentration R/D 1 injeksi 45



**Gambar 4.20 Contur Velocity Pathline Injeksi 45 R/D 1**



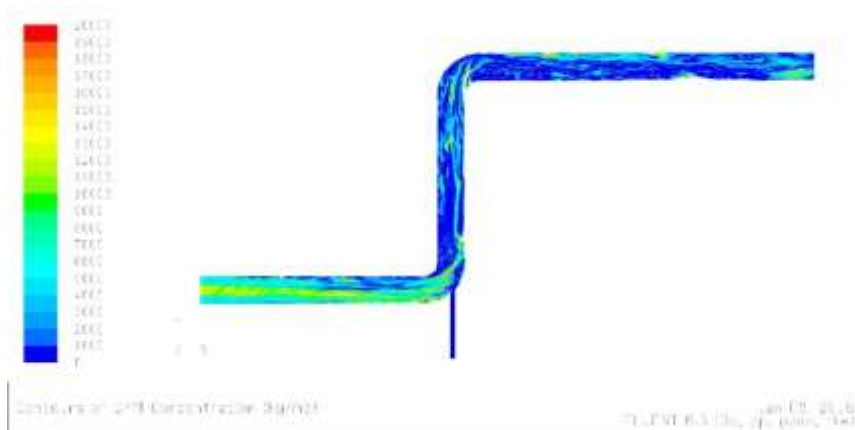
Face	Contur Concentration	DPM	Face	Contur Concentration	DPM
a. Inlet			f. Outlet		
b. 0° Elbow 1			g. 0° Elbow 2		
c. 30° Elbow 1			h. 30° Elbow 2		
d. 60° Elbow 1			i. 60° Elbow 2		



**Gambar 4.21 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel Solid Pada Dinding Elbow dan Pipa injeksi 45 dan R/D 1 di tiap-tiap penampang surface elbow**

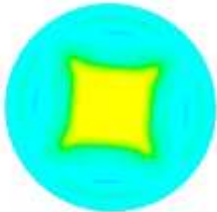
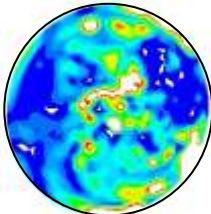
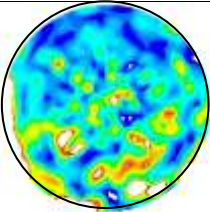
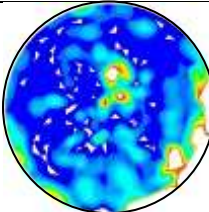
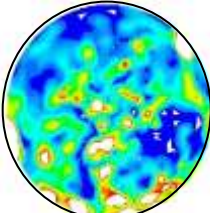
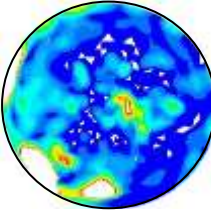
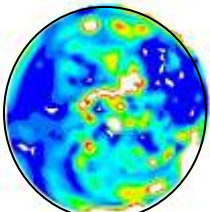
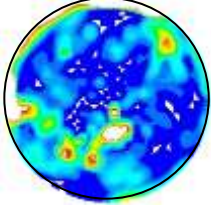
**Gambar 4.21** menunjukkan perilaku aliran gas solid yang melewati elbow 1 dan elbow 2, pada gambar ditunjukkan bahwa sebelum melewati elbow / posisi 0° aliran memiliki contour DPM concentration yang tinggi, kemudian pada posisi 30° mulai terlihat konsentrasi yang berkurang dari kontur karena adanya air injected pada sudut 45° tepat sebelum masuk elbow 1. Kemudian pada daerah memasuki elbow 2 terlihat konsentrasi yang tinggi

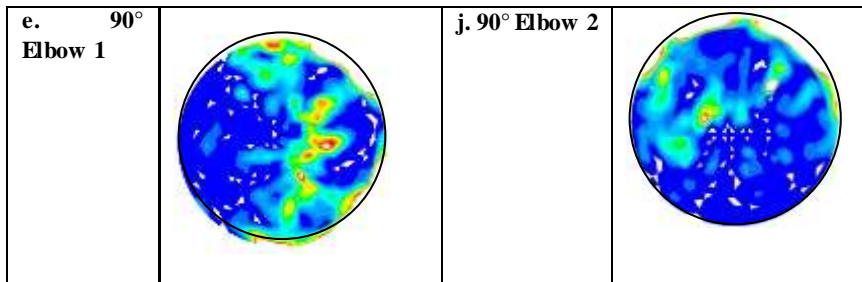
### 4.5. 3. R/D 1 injeksi 90



**Gambar 4.22 Contur Velocity Pathline Injeksi 45 R/D 1**

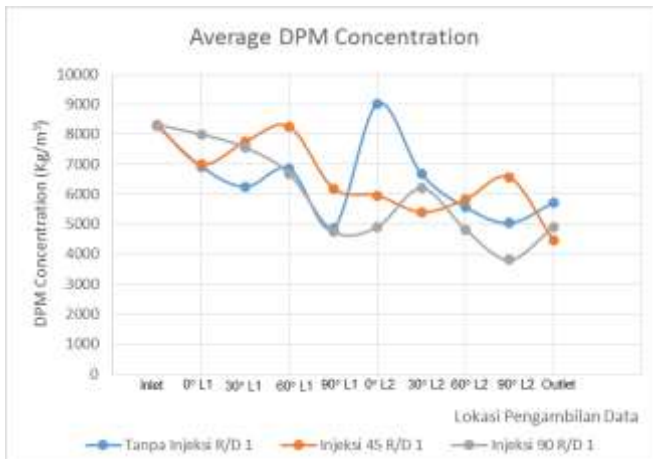


Face	Contur Concentration	DPM	Face	Contur Concentration	DPM
a. Inlet			f. Outlet		
b. 0° Elbow 1			g. 0° Elbow 2		
c. 30° Elbow 1			h. 30° Elbow 2		
d. 60° Elbow 1			i. 60° Elbow 2		



**Gambar 4.23 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel Solid Pada Dinding Elbow dan Pipa injeksi 90 dan R/D 1 di tiap-tiap penampang surface elbow**

Pada gambar 4.23 diatas adalah gambar *elbow* 90° yang ditambahkan dengan injeksi *air assisted* dengan sudut ijeksi 90°. Pada gambar diatas penyebaran partikel terlihat homogen untuk range DPM *concentration* 0- 200000 kg/m<sup>3</sup>. Pada aliran *gas-solid* mulai terlihat fenomena terjadinya pengendapan pada bagian dinding *elbow*. Pola pengendapan hampir sama dengan pola pengendapan pada *elbow* tanpa adanya penambahan injeksi *air assisted* tetapi perbedaan yang paling mencolok dapat dilihat bahwa dengan penambahan injeksi *air assisted* maka pengendapan pada dinding *elbow* pada radius dalam akan mundur ke belakang. Contoh casenya pada injeksi 45 memiliki konsentrasi yang tinggi pada daerah outlet elbow 2. Untuk melihat ketebalan dari endapan yang terjadi pada masing-masing *bend* dapat dilihat dari profile DPM *consentration* pada penampang melintang *bend* seperti gambar 4.24 dibawah ini.



**Gambar 4.24** grafik perbandingan average DPM concentration tanpa ada injeksi dengan injeksi 45 dan 90 dengan R/D 1

Pada grafik *DPM concentration* pada gambar 4.23 menjelaskan mengenai *DPM concentration* rata-rata pada masing-masing luas penampang sebelum masuk *elbow*, pada *elbow*, dan setelah keluar *elbow*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai *DPM* rata-rata yang paling kecil pada sebagian besar luar penampang melintang dimiliki oleh *elbow* dengan injeksi *air assisted* dengan sudut injeksi 30° hal ini mengindikasikan bahwa dengan menambahkan *air assisted* dengan sudut injeksi 30° efektif untuk mengurangi terjadinya pengendapan partikel pada dinding *elbow* dan pada dinding pipa setelah *elbow*. Sedangkan pada *elbow* tanpa adanya penambahan *air assisted* mempunyai nilai dari *average DPM concentration* yang tinggi pada semua penampang melintang. Dan untuk *elbow* dengan penambahan *air assisted* dengan sudut injeksi 45° mempunyai nilai *average DPM concentration* berada di antara dua yang lainnya.

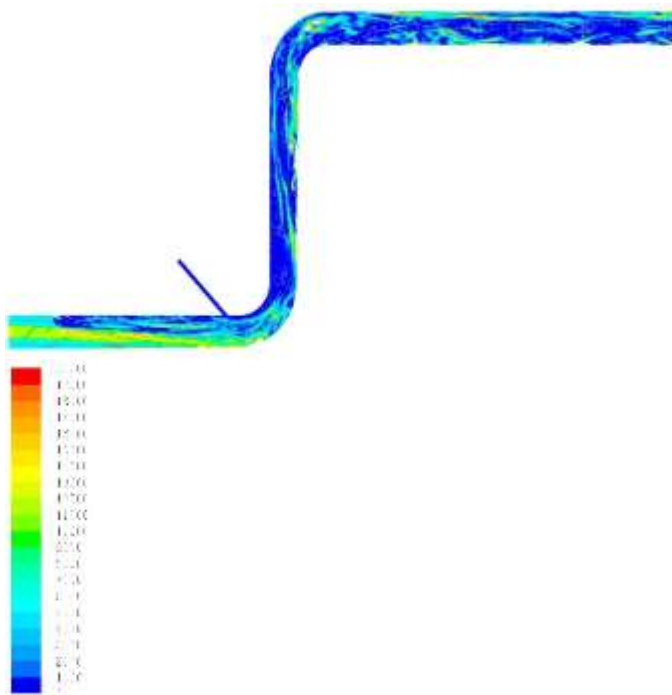
*DPM average concentration* yang terjadi pada aliran *gas-solid* dengan sudut injeksi membentuk sudut  $30^\circ$  menghasilkan nilai yang paling kecil, hal ini terjadi karena dengan injeksi sudut yang kecil akan dihasilkan resultan kecepatan yang paling besar antara udara injeksi dengan aliran *gas-solid*. Hal ini akan mengakibatkan aliran *gas-solid* memiliki momentum aliran yang besar untuk membawa partikel yang mengendap ke dalam aliran. Sedangkan *DPM average concentration* yang terjadi pada aliran *gas-solid* dengan sudut injeksi membentuk sudut  $45^\circ$  akan menghasilkan nilai yang lebih besar dari pada aliran *gas-solid* dengan injeksi membentuk sudut  $30^\circ$ . Hal ini terjadi karena dengan sudut injeksi  $45^\circ$  dihasilkan resultan *velocity* yang lebih kecil dibandingkan dengan sudut injeksi  $30^\circ$ , dengan demikian maka momentum aliran akan lebih kecil jika dan berakibat dengan semakin sedikitnya endapan partikel solid yang terbawah oleh aliran udara.

Pada grafik *DPM concentration* pada gambar 4.27 menjelaskan mengenai *DPM concentration* rata-rata pada masing-masing luas penampang sebelum masuk *elbow*, pada *elbow*, dan setelah keluar *elbow*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai *DPM* rata-rata yang paling kecil pada sebagian besar luar penampang melintang dimiliki oleh *elbow* dengan injeksi *air assisted* dengan sudut injeksi  $90^\circ$  hal ini mengindikasikan bahwa dengan menambahkan *air assisted* dengan sudut injeksi  $90^\circ$  efektif untuk mengurangi terjadinya pengendapan partikel pada dinding *elbow* dan pada dinding pipa setelah *elbow*. Sedangkan pada *elbow* tanpa adanya penambahan *air assisted* mempunyai nilai dari *average DPM concentration* yang tinggi pada semua penampang melintang. Dan untuk *elbow* dengan penambahan *air assisted* dengan sudut injeksi  $45^\circ$  mempunyai nilai *average DPM concentration* berada di antara dua yang lainnya.

## **4.6 Analisa DPM Concentration R/D 1.5**

### **4. 7. 1. RD 1,5 injeksi 45**

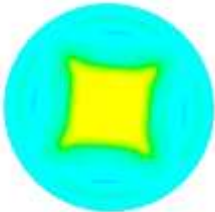
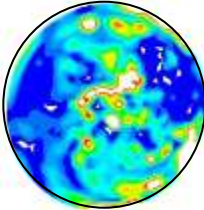
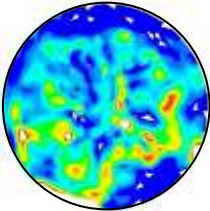
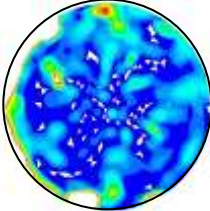
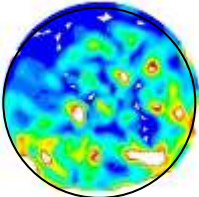
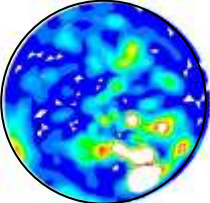
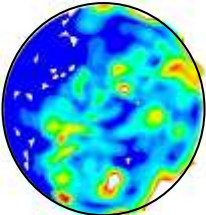
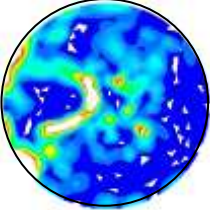


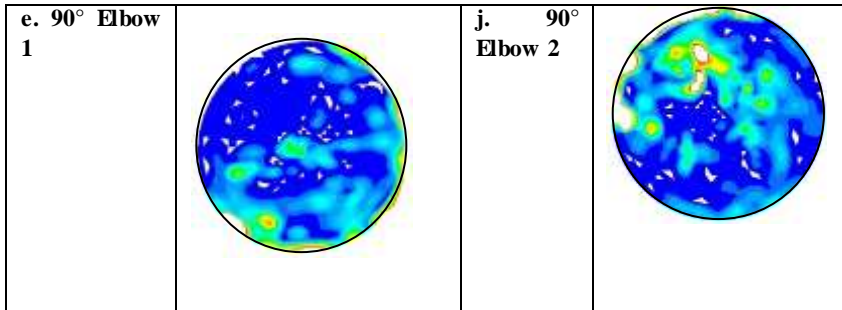


**Gambar 4.25 Contur DPM concentration pada penampang surface pipa Injeksi 45 R/D 1.5**



Face	Contur Concentration	DPM	Face	Contur Concentration	DPM

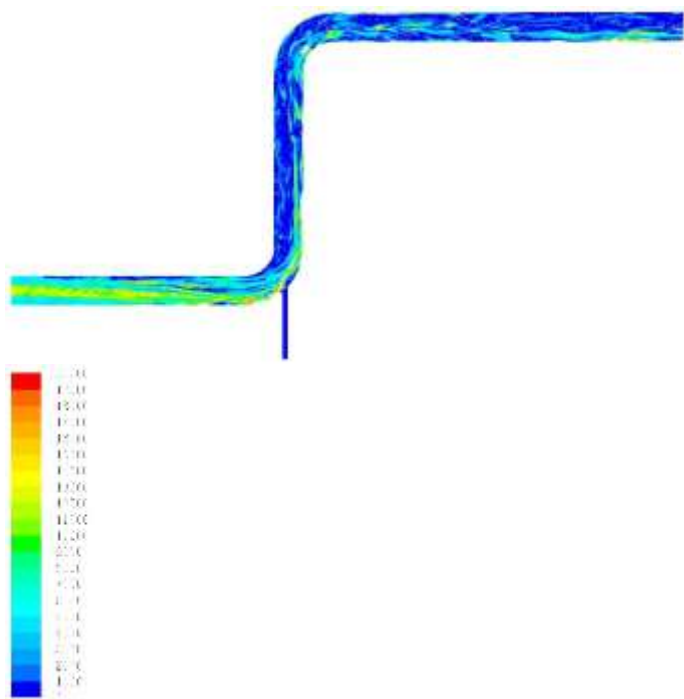
a. Inlet		f. Outlet	
b. 0° Elbow 1		g. 0° Elbow 2	
c. 30° Elbow 1		h. 30° Elbow 2	
d. 60° Elbow 1		i. 60° Elbow 2	



**Gambar 4.26 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel Solid Pada Dinding Elbow dan Pipa injeksi 45 dan R/D 1,5 di tiap-tiap penampang surface elbow**

Pada gambar 4.26 diatas adalah gambar *elbow* 90° yang ditambahkan dengan injeksi *air assisted* dengan sudut ieksi 45°. Pada gambar diatas pada aliran gas solid mulai ada pengendapan pada dinding radius luar elbow. Pola pengendapan hampir sama dengan pola pengendapan pada elbow tanpa adanya penambahan injected air assisted tetapi perbedaan paling mencolok dapat dilihat bahwa dengan penambahan injected air assisted maka pengendapan pada dinding elbow radius dalam akan mundur kebelakang. Hal ini terlihat pada posisi 30° dan 60° elbow 1. Dan cenderung berkurang konsentrasinya dengan air injected pada sudut 45° sebelum masuk elbow 1. Dan pada daerah masuk elbow 2 terlihat konsentrasi yang tinggi pada daerah diameter dalam elbow, karena pengaruh profile geometri dari elbow yang mengalami penyempitan aliran. Dan akan memiliki konsentrasi yang cenderung merata pada posisi setelah keluar elbow 2.

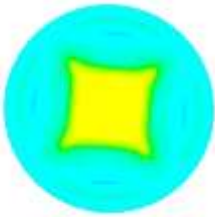
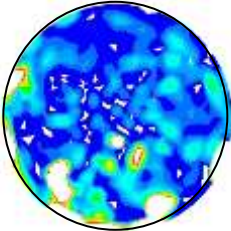
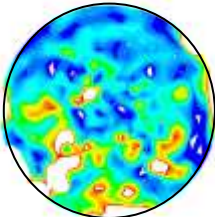
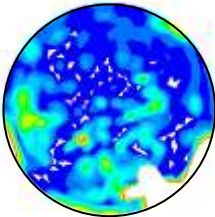
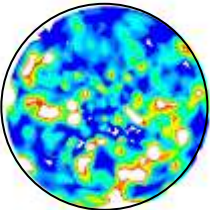
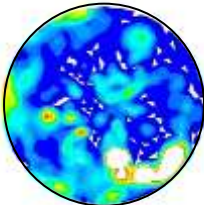
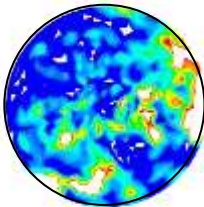
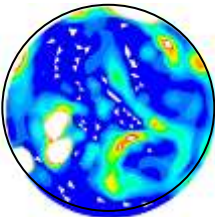
#### **4. 6. 2. RD 1.5 Injeksi 90**

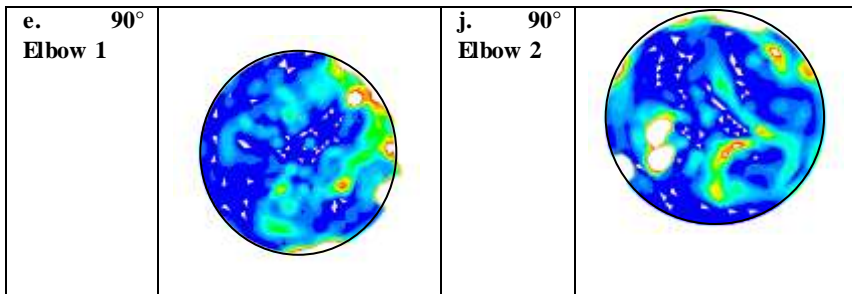


**Gambar 4.27** Contur DPM concentration pada penampang surface pipa Injeksi 90 R/D 1.5



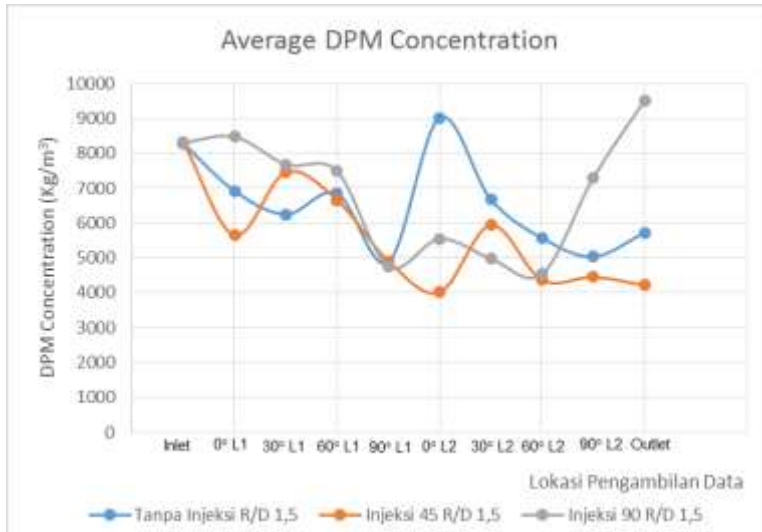
Face	Contur Concentration	DPM	Face	Contur Concentration	DPM

<b>a. Inlet</b>		<b>f. Outlet</b>	
<b>b. 0° Elbow 1</b>		<b>g. 0° Elbow 2</b>	
<b>c. 30° Elbow 1</b>		<b>h. 30° Elbow 2</b>	
<b>d. 60° Elbow 1</b>		<b>i. 60° Elbow 2</b>	



**Gambar 4.28 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel Solid Pada Dinding Elbow dan Pipa injeksi 45 dan R/D 1,5 di tiap-tiap penampang surface elbow**

Pada gambar 4.28 diatas adalah gambar *elbow* 90° yang ditambahkan dengan injeksi *air assisted* dengan sudut ijeksi 90°. Pada gambar diatas pada aliran gas solid mulai ada pengendapan pada dinding radius luar elbow. Pola pengendapan hampir sama dengan pola pengendapan pada elbow tanpa adanya penambahan injected air assisted tetapi perbedaan paling mencolok dapat dilihat bahwa dengan penambahan injected air assisted maka pengendapan pada dinding elbow radius dalam akan mundur kebelakang. Hal ini terlihat pada posisi 30° dan 60° elbow 1. Dan cenderung berkurang konsentrasinya dengan air injected pada sudut 45° sebelum masuk elbow 1. Dan pada daerah masuk elbow 2 terlihat konsentrasi yang tinggi pada daerah diameter dalam elbow, karena pengaruh profile geometri dari elbow yang mengalami penyempitan aliran. Dan akan memiliki konsentrasi yang cenderung merata pada posisi setelah keluar elbow 2.



**Gambar 4.29** grafik perbandingan average DPM concentration tanpa ada injeksi dengan injeksi 45 dan 90 dengan R/D 1,5

Pada grafik DPM *concentration* pada gambar 4.29 menjelaskan mengenai DPM *concentration* rata-rata pada masing-masing luas penampang sebelum masuk *elbow*, pada *elbow*, dan setelah keluar *elbow*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai DPM rata-rata yang paling kecil pada sebagian besar luar penampang melintang dimiliki oleh *elbow* dengan injeksi *air assisted* dengan sudut injeksi 45° hal ini mengindikasikan bahwa dengan menambahkan *air assisted* dengan sudut injeksi 45° efektif untuk mengurangi terjadinya pengendapan partikel pada dinding *elbow* dan pada dinding pipa setelah *elbow*. Sedangkan pada *elbow* tanpa adanya penambahan *air assisted* mempunyai nilai dari *average DPM concentration* yang tinggi pada semua penampang melintang. Dan untuk *elbow* dengan penambahan *air assisted* dengan sudut injeksi 45° mempunyai nilai *average DPM concentration* berada di antara dua yang lainnya.

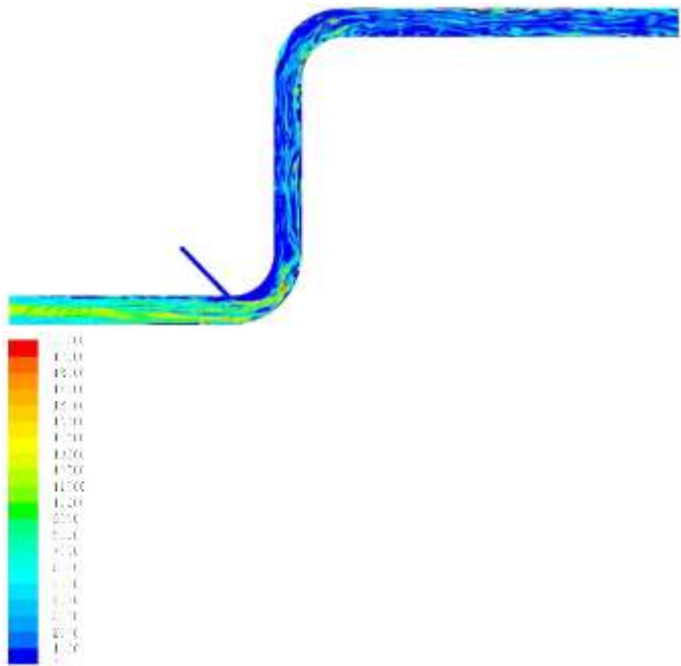
*DPM average concentration* yang terjadi pada aliran *gas-solid* dengan sudut injeksi membentuk sudut  $45^\circ$  menghasilkan nilai yang paling kecil, hal ini terjadi karena dengan injeksi sudut yang kecil akan dihasilkan resultan kecepatan yang paling besar antara udara injeksi dengan aliran *gas-solid*. Hal ini akan mengakibatkan aliran *gas-solid* memiliki momentum aliran yang besar untuk membawa partikel yang mengendap ke dalam aliran. Sedangkan *DPM average concentration* yang terjadi pada aliran *gas-solid* dengan sudut injeksi membentuk sudut  $45^\circ$  akan menghasilkan nilai yang lebih besar dari pada aliran *gas-solid* dengan injeksi membentuk sudut  $45^\circ$ . Hal ini terjadi karena dengan sudut injeksi  $45^\circ$  dihasilkan resultan *velocity* yang lebih kecil dibandingkan dengan sudut injeksi  $90^\circ$ , dengan demikian maka momentum aliran akan lebih kecil jika dan berakibat dengan semakin sedikitnya endapan partikel solid yang terbawah oleh aliran udara.

Pada grafik *DPM concentration* pada gambar 4.29 menjelaskan mengenai *DPM concentration* rata-rata pada masing-masing luas penampang sebelum masuk *elbow*, pada *elbow*, dan setelah keluar *elbow*. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai *DPM* rata-rata yang paling kecil pada sebagian besar luar penampang melintang dimiliki oleh *elbow* dengan injeksi *air assisted* dengan sudut injeksi  $90^\circ$  hal ini mengindikasikan bahwa dengan menambahkan *air assisted* dengan sudut injeksi  $90^\circ$  efektif untuk mengurangi terjadinya pengendapan partikel pada dinding *elbow* dan pada dinding pipa setelah *elbow*. Sedangkan pada *elbow* tanpa adanya penambahan *air assisted* mempunyai nilai dari *average DPM concentration* yang tinggi pada semua penampang melintang. Dan untuk *elbow* dengan penambahan *air assisted* dengan sudut injeksi  $45^\circ$  mempunyai nilai *average DPM concentration* berada di antara dua yang lainnya.


## **4.7 Analisa DPM Concentration R/D 2**

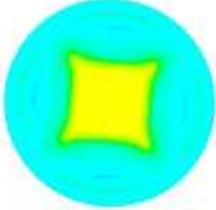
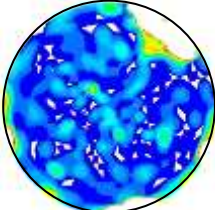
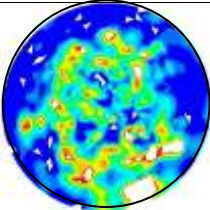
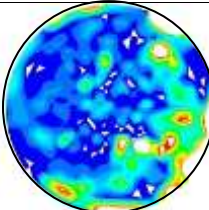
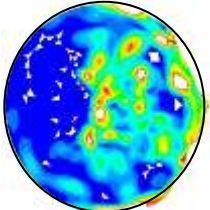
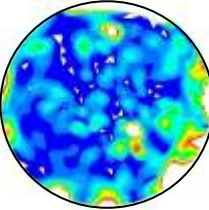
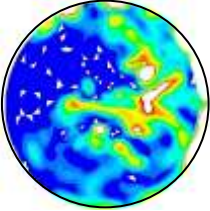
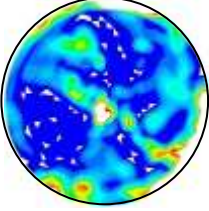
### **4.7.1. RD 2 injeksi 45**

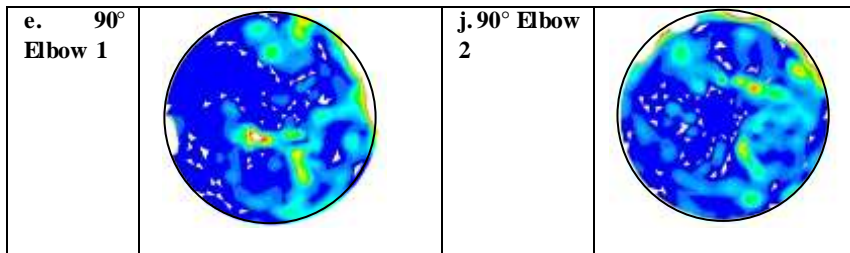




**Gambar 4.30** Contur DPM concentration pada penampang surface pipa Injeksi 45 R/D 2

					
Face	Contur	DPM	Face	Contur	DPM
	Concentration			Concentration	

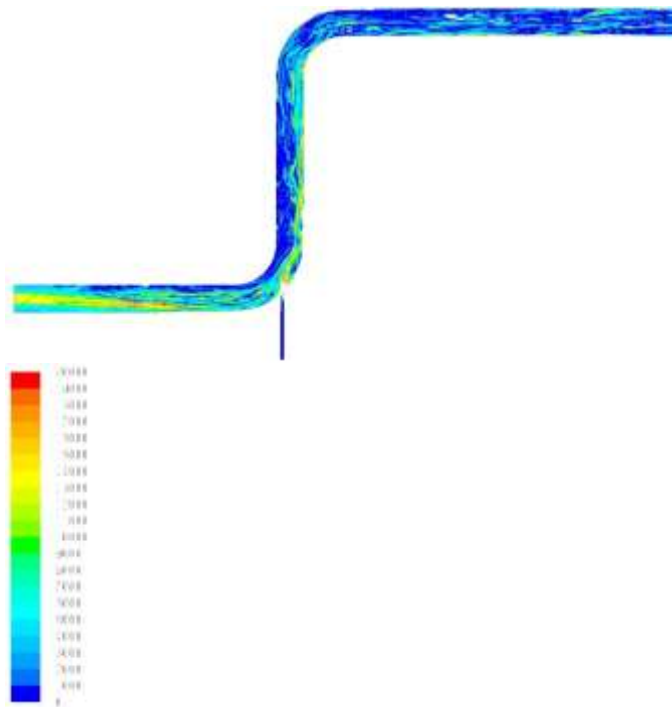
<b>a. Inlet</b>		<b>f. Outlet</b>	
<b>b. 0° Elbow 1</b>		<b>g. 0° Elbow 2</b>	
<b>c. 30° Elbow 1</b>		<b>h. 30° Elbow 2</b>	
<b>d. 60° Elbow 1</b>		<b>i. 60° Elbow 2</b>	



**Gambar 4.31 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel Solid Pada Dinding Elbow dan Pipa injeksi 45 dan R/D 2 di tiap-tiap penampang surface elbow**

Pada gambar 4.31 diatas adalah gambar *elbow* 90° yang ditambahkan dengan injeksi *air assisted* dengan sudut ijeksi 45°. Pada gambar diatas pada aliran gas solid mulai ada pengendapan pada dinding radius luar elbow. Pola pengendapan hampir sama dengan pola pengendapan pada elbow tanpa adanya penambahan injected air assisted tetapi perbedaan paling mencolok dapat dilihat bahwa dengan penambahan injected air assisted maka pengendapan pada dinding elbow radius dalam akan mundur kebelakang. Hal ini terlihat pada posisi 30° dan 60° elbow 1. Dan cenderung berkurang konsentrasinya dengan air injected pada sudut 45° sebelum masuk elbow 1. Dan pada daerah masuk elbow 2 terlihat konsentrasi yang tinggi pada daerah diameter dalam elbow, karena pengaruh profile geometri dari elbow yang mengalami penyempitan aliran. Dan akan memiliki konsentrasi yang cenderung merata pada posisi setelah keluar elbow 2.

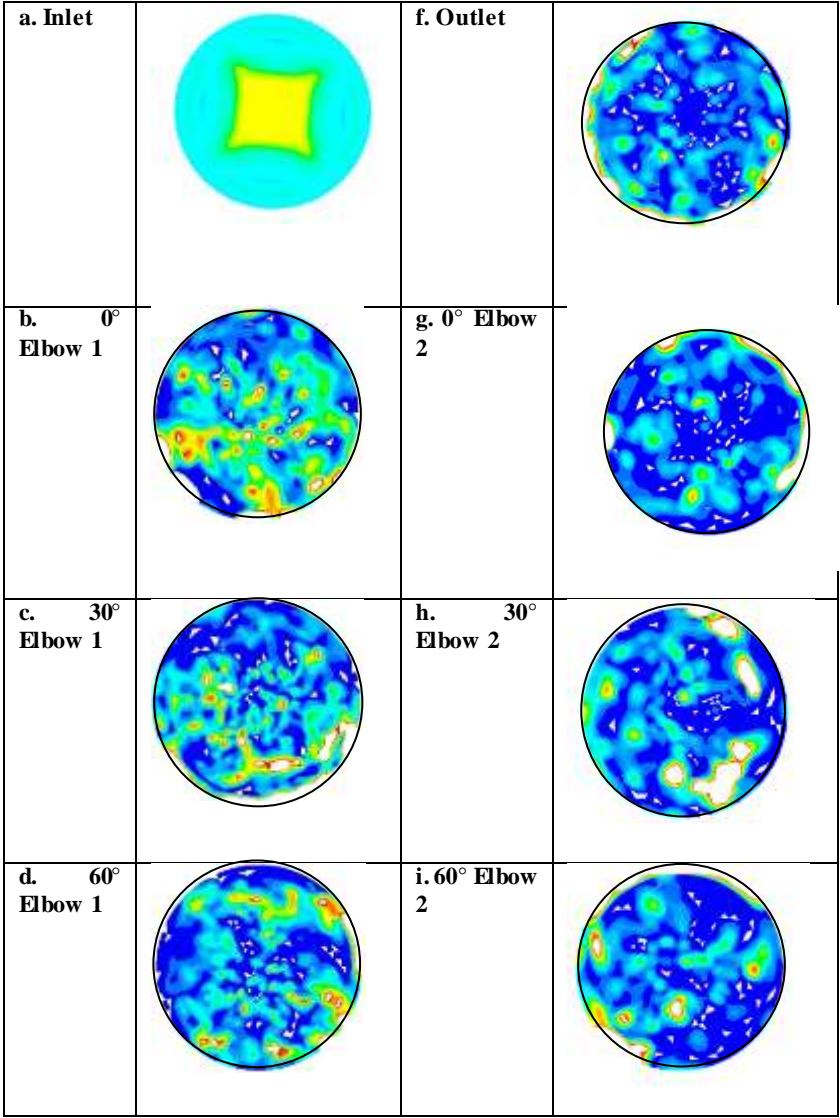
#### **4. 7. 2. RD 2 injeksi 90**

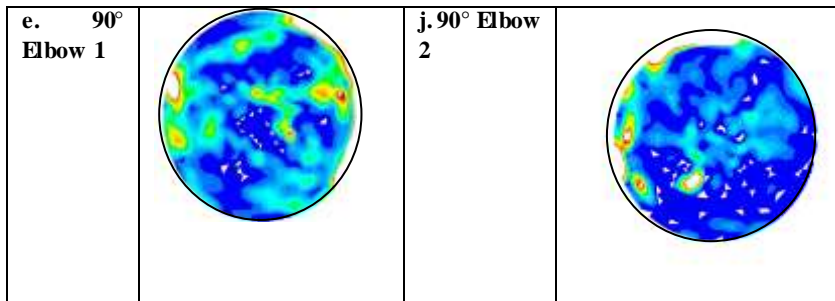


**Gambar 4.32 Contur DPM concentration pada penampang surface pipa Injeksi 90 R/D 2**



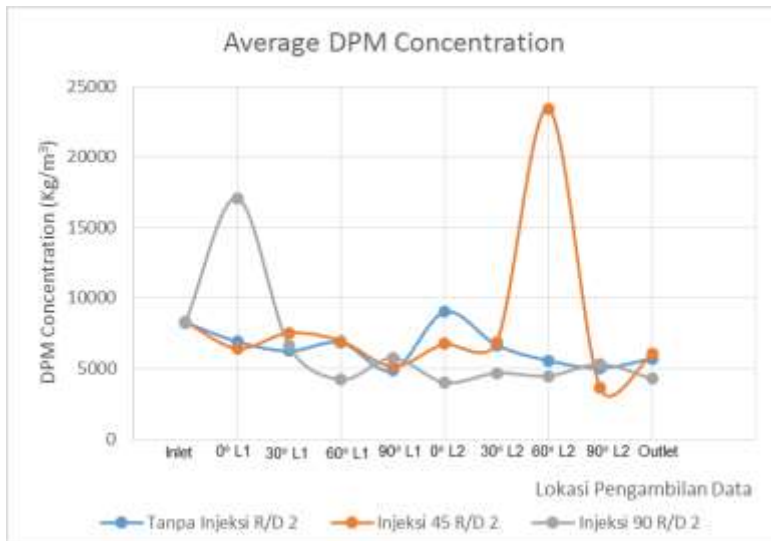
Face	Contur Concentration	DPM	Face	Contur Concentration	DPM
------	-------------------------	-----	------	-------------------------	-----





**Gambar 4.33 Adalah Gambar Distribusi Penyebaran Partikel Solid Pada Dinding Elbow dan Pipa injeksi 90 dan R/D 2 di tiap-tiap penampang surface elbow**

Pada gambar 4.33 diatas adalah gambar *elbow* 90° yang ditambahkan dengan injeksi *air assisted* dengan sudut ijeksi 90°. Pada gambar diatas pada aliran gas solid mulai ada pengendapan pada dinding radius luar elbow. Pola pengendapan hampir sama dengan pola pengendapan pada elbow tanpa adanya penambahan injected air assisted tetapi perbedaan paling mencolok dapat dilihat bahwa dengan penambahan injected air assisted maka pengendapan pada dinding elbow radius dalam akan mundur kebelakang. Hal ini terlihat pada posisi 30° dan 60° elbow 1. Dan cenderung berkurang konsentrasinya dengan air injected pada sudut 45° sebelum masuk elbow 1. Dan pada daerah masuk elbow 2 terlihat konsentrasi yang tinggi pada daerah diameter dalam elbow, karena pengaruh profile geometri dari elbow yang mengalami penyempitan aliran. Dan akan memiliki konsentrasi yang cenderung merata pada posisi setelah keluar elbow 2.



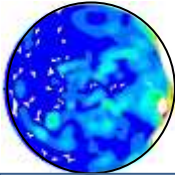
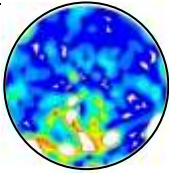
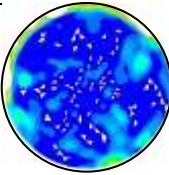
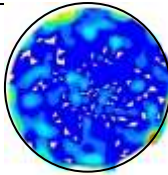
**Gambar 4.34 grafik perbandingan average DPM concentration tanpa ada injeksi dengan injeksi 45 dan 90 dengan R/D 2**

Pada grafik DPM *concentration* pada gambar 4.34 menjelaskan mengenai DPM *concentration* rata-rata pada masing-masing luas penampang sebelum masuk *elbow*, pada *elbow*, dan setelah keluar *elbow* pada geometri pipa dengan R/D = 2. Dari grafik tersebut terlihat bahwa nilai DPM rata-rata yang paling kecil pada sebagian besar luar penampang melintang dimiliki oleh *elbow* dengan injeksi *air assisted* dengan sudut injeksi 90° hal ini mengindikasikan bahwa dengan menambahkan *air assisted* dengan sudut injeksi 90° efektif untuk mengurangi terjadinya pengendapan partikel pada dinding *elbow* dan pada dinding pipa setelah *elbow*. Sedangkan pada *elbow* tanpa adanya penambahan *air assisted* mempunyai nilai dari *average DPM concentration* yang tinggi pada semua penampang melintang. Kemudian untuk *elbow* dengan penambahan *air assisted* dengan

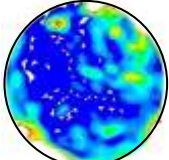
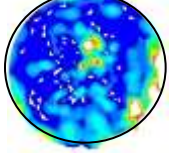
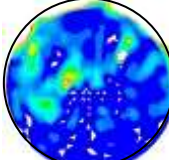
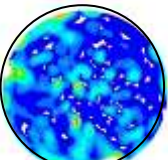
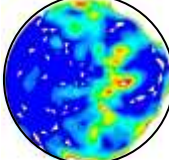
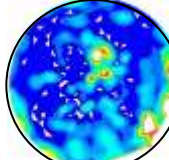
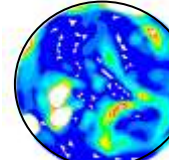
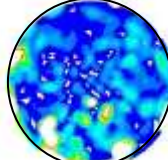
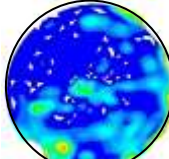
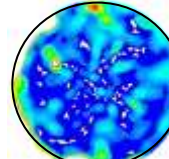
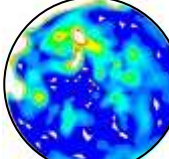
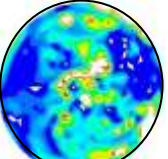
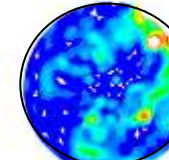
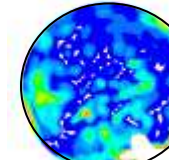
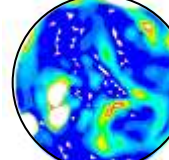
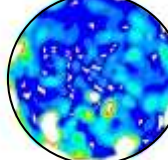
sudut injeksi  $45^\circ$  mempunyai nilai *average DPM concentration* berada di antara dua yang lainnya.

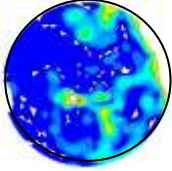
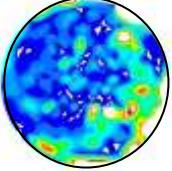
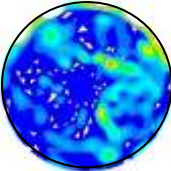
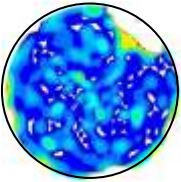
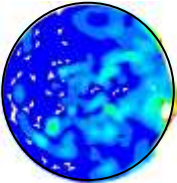
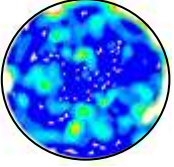
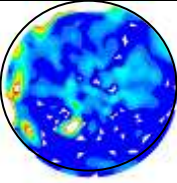
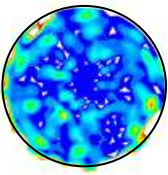
*DPM average concentration* yang terjadi pada aliran *gas-solid* dengan sudut injeksi membentuk sudut  $90^\circ$  menghasilkan nilai yang paling kecil, hal ini terjadi karena dengan injeksi sudut yang kecil akan dihasilkan resultan kecepatan yang paling besar antara udara injeksi dengan aliran *gas-solid*. Hal ini akan mengakibatkan aliran *gas-solid* memiliki momentum aliran yang besar untuk membawa partikel yang mengendap ke dalam aliran. Sedangkan *DPM average concentration* yang terjadi pada aliran *gas-solid* dengan sudut injeksi membentuk sudut  $45^\circ$  akan menghasilkan nilai yang lebih besar dari pada aliran *gas-solid* dengan injeksi membentuk sudut  $30^\circ$ . Hal ini terjadi karena dengan sudut injeksi  $45^\circ$  dihasilkan resultan *velocity* yang lebih kecil dibandingkan dengan sudut injeksi  $30^\circ$ , dengan demikian maka momentum aliran akan lebih kecil jika dan berakibat dengan semakin sedikitnya endapan partikel solid yang terbawah oleh aliran udara.

#### 4.8 Analisa Perbandingan DPM Concentration Pada Tiap Penampang Aliran Setelah Meninggalkan Elbow 1 dan Elbow 2

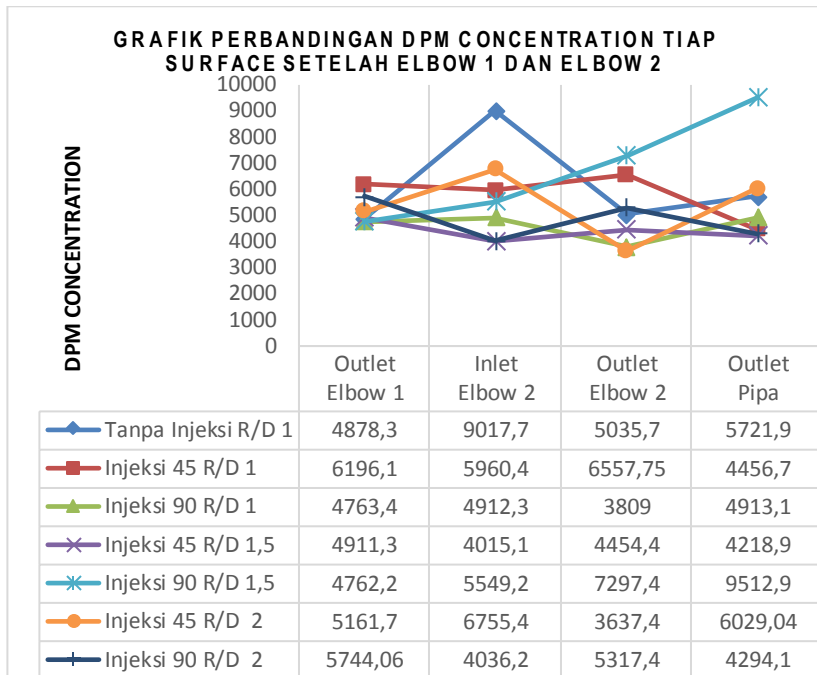
Variasi Elbow	$90^\circ$ Elbow 1	$0^\circ$ Elbow 2	$90^\circ$ Elbow 2	Outlet
Tanpa Injeksi	 4878,3	 9017.7	 5035.7	 5721.9



RD 1	45				
		6196.1	5960.4	6557.75	4456.7
	90				
		4763.4	4912.3	3809	4913.1
RD 1.5	45				
		4911.3	4015.1	4454.4	4218.9
	90				
		4762.2	5549.2	7297.4	9512.9

RD 2	45				
		5161.7	6755.4	3637.4	6029.4
	90				
		5744.06	4036.2	5317.4	4294.1

**Gambar 4.35** Contur Distribusi Penyebaran Partikel *Solid*  
Pada Dinding *Elbow* dan Pipa di tiap-tiap penampang surface  
setelah elbow 1 dan elbow 2



**Gambar 4.36 grafik perbandingan average DPM concentration tiap surface setelah elbow 1 dan elbow 2**

Dari data grafik perbandingan average velocity pada face setelah meninggalkan elbow terlihat bahwa average DPM yang paling tinggi terdapat pada surface outlet setelah elbow 1 yaitu pada penampang tanpa injeksi, Karena terjadi secondary flow akibat bentuk dari elbow. Kemudian direduksi dengan injeksi 45° dan 90° pada penampang dengan rasio R/D 1, 1,5 , 2 maka terlihat bahwa dengan R/D 1 menggunakan injeksi 90° dapat mereduksi average DPM concentration yang signifikan pada pada daerah outlet elbow 1 dan outlet elbow 2, Karena pada tiap tiap surface setelah elbow memiliki nilai average DPM concentration dengan

trendline nilai yang kecil dari geometri elbow yang lain. Dan pada injeksi sudut  $45^\circ$  pada R/D 1,5 memiliki konsentrasi yang rendah pula dari nilai average injected yang lain.

Setelah melihat perbedaan nilai concentration pada outlet elbow diatas maka dapat dilihat maka semakin besar nilai R/D maka nilai average DPM concentration akan cenderung turun, tetapi pada grafik diatas, pada case R/D 2 memiliki nilai DPM concentration yang lebih besar dari R/D 1.5 tapi nilainya turun kembali pada posisi inlet elbow 2. Dan pada sudut injected  $90^\circ$  memiliki nilai DPM concentration yang cenderung turun, tetapi pada grafik diatas, pada R/D 1,5 grafik nilai DPM cenderung naik. Hal ini diakibatkan konsentrasi aliran dari elbow didorong kebelakang dengan adanya injected air sebesar  $90^\circ$  pada elbow 1, sehingga pada outlet pipa dengan sudut injeksi  $90^\circ$  pada R/D 1.5 nilai DPM konsentrasinya besar.

*Halaman Kosong*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Hasil yang didapat dari studi numerik mengenai *dense phase pneumatic conveyor* dengan tambahan *pressurized air assisted* pada elbow 90° dengan variasi R/D 1, 1,5 , dan 2 , serta besar sudut injeksi  $\Theta$  45° dan  $\Theta$  =90° adalah

1. Semakin kecil nilai R/D pada elbow 90° aliran gas solid yang melewati cenderung untuk terbentuknya endapan partikel solid pada dinding elbow dan sesaat setelah aliran keluar elbow 1, serta sesaat melewati elbow 2, karena terbentuknya separasi aliran yang mengalir vertical ke elbow 2.
2. Penambahan *pressurized air assisted* dapat mengurangi terbentuknya *secondary flow* pada aliran *gas-solid* yang melewati *elbow 1 dan elbow 2*
3. Pengendapan partikel *solid* terjadi pada dinding bawah *elbow*, dinding *radius* luar *elbow*, dan yang paling dominan terjadi pada dinding radius dalam *elbow 1 dan elbow 2* dan pada diding pipa *outlet* pada sisi yang sama.
4. Pengendapan partikel *solid* lebih dominan disebabkan oleh turbulensi dari aliran udara pembawa dibandingkan dengan efek tumbukan partikel dengan dinding elbow.
5. Penambahan *air assisted* dapat meningkatkan momentum dan kecepatan aliran yang melewati *elbow 90°*.
6. Sudut injeksi *air assisted* dengan  $\Theta = 90^\circ$  akan memberikan efek pengurangan terhadap terjadinya penyumbatan pada pipa elbow lebih efektif dibandingkan dengan pemberian *air assisted* dengan sudut injeksi  $\Theta = 45^\circ$ .
7. Pemberian *air assisted* dengan sudut injeksi  $\Theta = 90^\circ$  cenderung memberikan efek *blocking* terhadap aliran *gas-solid* yang masuk elbow 1, karena ditandai dengan konsentrasi yang tinggi pada permukaan bend pada 45°.

#### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan setelah melakukan penelitian dan diharap berguna untuk penelitian selanjutnya adalah sebagai berikut:

1. Hindari penggunaan *mesh* yang berbentuk *trigonal* karena mempengaruhi laju tercapainya konvergensi.
2. Untuk aliran dengan fraksi volume partikel tinggi sebaiknya menggunakan pendekatan ***multiphase eularian-eularian*** kerana model itu bisa memprediksi interaksi antar fase dan interaksi antar partikel *solid* didalam aliran.
3. Perlu dilakukan variasi terhadap letak dilakukan injeksi *air assisted* terhadap aliran *gas-solid* yang melewati elbow untuk memberikan hasil reduksi endapan partikel yang paling efisien.

*Halaman Kosong*



## **DAFTAR PUSTAKA**

- [1] Perry, Robert H and Green, Don w. 1999 “Chemical Engineer’s Handbook “. New York: Mc Graw Hill Inc.
- [2] Mills, David. 2004. ”Pneumatic Conveying Design Guide”. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann
- [3] Ma, Ac., Dkk 2010 International Journal, Numerical study on pressure prediction and its main influence factors
- [4] Sariadi 2015 Tugas Akhir, Simulasi Numerik Pada Dense Phase Pneumatic Conveyor Dengan Pressurized Air Assisted Untuk Mereduksi Terjadinya Clogged Pada Sistem Perpipaan.
- [5] Joewono Ari Diktat Kuliah “Kapasitas Dan Daya Pada Conveyor”
- [6 ] Tuakia Firman 2008 .” Fluent User Guide”. Informatika Bandung

## **Riwayat Hidup Penulis**



Penulis lahir di Tuban, pada tanggal 17 Januari 1990 dari pasangan Bapak Kastijan dan ibu Sudarwati. Merupakan putra kedua dari empat bersaudara. Sepanjang 25 tahun ini penulis telah menempuh pendidikan formal dimulai dari SDN 1 Prambon Tergayang, MTs Sunan Bonang Parengan Tuban, dan MAN 1 Bojonegoro

Setelah lulus SMA tahun 2008, penulis melanjutkan pendidikan ke jenjang perguruan tinggi dan diterima di jurusan Diploma 3 Teknik Mesin FTI-ITS Surabaya diterima di tahun 2009. Dalam mengikuti proses pembelajaran akademik, penulis mengambil bidang konversi energi dan mengambil Tugas Akhir di bidang yang sama. Penulis juga terlibat aktif dalam keorganisasian yang ada di dalam jurusan D3 Teknik Mesin yaitu HMDM, UKM Pramuka ITS, dan HMI Cabang Surabaya Komisariat Mesin Sepuluh Nopember. Penulis menyelesaikan kuliah D3 selama 3,5 tahun dan lulus pada maret 2013, penulis juga pernah bekerja di PT Pantheon Energy (Pabrik Manufaktur Kapal milik Alumni ITS selama 6 bulan pada akhir semester kuliah di D3), kemudian lulus D3 diterima di PT Astra Honda Motor

Jakarta, sempat bekerja selama 3 bulan sebagai Quality Control Operated, dan memutuskan untuk kuliah di S1 Teknik Mesin ITS lintas jalur.

Selama kuliah S1 lintas jalur, penulis sempat bekerja di kontraktor Mechanical Electrical khususnya bidang HVAC sebagai Mechanical Engineer and Estimator selama 1,5 tahun di Surabaya. Dan terakhir bekerja sebagai Tools and Maintenance Coordinator di PT AKAS, salah satu kontraktor sipil di Surabaya. 1,5 Tahun penulis baru menyelesaikan revisi Tugas Akhir ini, karena cuti 2 semester dan kembali lagi kuliah karena masih ada satu mata kuliah belum lulus, penulis kembali kekampus untuk memulai semua dari awal lagi, dengan teman teman yang sudah lulus semua, hanya tinggal 4 orang yang masih tersisa dari angkatan LJ gasal 2013, Penulis masih belum lulus untuk matakuliah statistik dan perencanaan eksperimen yang sudah diambil 2 kali, dengan dosen lulusan Taiwan, tapi tidak lulus, penulis sudah mencoba melobi karena hanya tinggal satu mata kuliah, tapi dosen yang bersangkutan tidak bergeming, saya sudah meminta tugas tambahan atau mencoba mengkonfirmasi nilai saya tidak lulus dimana, kemudian dosen yang bersangkutan menjelaskan bahwa saya kurang nilai pada tugas besar 1 yaitu tugas *meresume* materi statistik dan perencanaan eksperimen, saya sudah menjelaskan bahwa saya mengerjakan sendiri tugas tersebut, karena sejak awal dosen yang bersangkutan berujar lebih mengedepankan kejujuran dan tidak mentolelir segala bentuk kerjasama ataupun plagiat, saya menulis dari buku referensi saya

resume sesuai materi bab dan yang penting penting saja, tapi kata dosen yang bersangkutan, bahwa perintahnya meresume, sedangkan yang saya kerjakan adalah merangkum, masih teringat penjelasan dosen yang bersangkutan “jika meresume itu dengan bahasa indonesia yang dimengerti, kalau pakai bahasa inggris itu namanya merangkum” saya mencoba melobi lagi tapi dosen yang bersangkutan tetap tidak bergeming untuk meluluskan saya, disaat teman-teman saya yang lain tidak lulus satu mata kuliah, saya masih ingat itu mata kuliah getaran, mata kuliah yang lebih sulit dari statistik (menurut saya) bisa diluluskan dengan mengerjakan tugas tambahan. Sungguh saya merasakan suatu ketidak adilan, tapi live must go on, penulis akhirnya memutuskan untuk melamar pekerjaan kembali, dan akhirnya diterima disalah satu perusahaan distributor alat alat industri dan kontraktor, penulis diterima sebagai sales engineer. Sudah menjadi kebiasaan bagi penulis untuk kuliah sambil bekerja, karena sejak kuliah dulu penulis sudah terbiasa hidup mandiri, bekerja dari satu perusahaan keperusahaan yang lain untuk modal hidup selama kuliah, sejak saya tulis buku ini kembali terhitung penulis sudah menempuh masa studi dari D3 Teknik Mesin sampai dengan Lintas Jalur Teknik Mesin selama 8 tahun, dengan reguler semester 12 semester yang terhitung. Penulis akhirnya harus cuti karena pekerjaan mewajibkan untuk training dijakarta selama 3 bulan akhirnya penulis memutuskan untuk cuti kuliah dengan tersisa satu mata kuliah, setahun menjadi sales engineer penulis memutuskan untuk resign dari

pekerjaannya, dan kembali melanjutkan studi kembali, ketika kembali mengambil mata kuliah dan perwalian dengan dosen, dan mengambil lagi mata kuliah yang belum lulus tersebut, penulis sangat terkejut karena kali ini mendapatkan dosen yang berbeda, seorang professor yang termasuk dosen yang disegani di Jurusan Teknik Mesin sendiri, dan terkenal idealis, tidak bisa di lobi. Penulis hanya bisa optimis untuk menempuh kuliah lagi, penulis mengikuti perkuliahan dan mengerjakan tugas sebagaimana mestinya kuliah, akhirnya dengan ijin Allah, penulis LULUS mata kuliah tersebut, dan diluluskan oleh seorang professor yang terkenal tidak mau naik sepeda motor dan memakai handphone. Ada rasa bangga tersendiri bagi penulis, karena telah diluluskan oleh seorang professor yang pernah studi di Amerika dan Eropa tersebut, sedangkan sudah mengambil 2 x oleh dosen doktor lulusan Taiwan malah tidak pernah lulus. Penulis berkeyakinan bahwa hidup hanya perjalanan sesuai yang telah digariskan oleh yang Maha Kuasa, sebenarnya masih banyak yang ingin penulis tulis dalam buku TA ini sebagai kisah perjalanan hidup penulis bisa lulus dari ITS. Besar harapan penulis untuk segera menyelesaikan studinya di S1 Teknik Mesin ini dan kembali terjun di dunia professional dan mengaplikasikan apa yang telah dipelajari selama kuliah di ITS 8 tahun ini.

Terimakasih atas bimbingan Bapak / Ibu Dosen dan Pengajar di ITS dan tak lupa teman-teman yang saya cintai 8 tahun akhirnya saya lulus dari ITS.

AlhamduLILLAHIRABBIL ALAMIN.....